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

На правах рукопису

ПЄСТОВА ІРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 528.8:504.75(-21)(043)

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ РОСЛИННОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

Дисертація
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
д. т. н., с.н.с. Станкевич
Сергій Арсенійович

Київ – 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ……..... 6

ВСТУП…… 7

РОЗДІЛ 1. Огляд існуючих методів оцінювання стану рослинності урбанізованих територій …..…… 15

1.1. Аналіз сучасних наземних методів дослідження рослинності урбанізованих територій……...…….…….. 15

1.1.1. Загальні принципи та нормативні положення щодо моніторингу стану рослинності урбанізованих територій …….. 16

1.1.2. Експертні методи дослідження рослинності …….. 19

1.1.3. Контактні методи визначення кількісно-якісних характеристик рослинності…….…….. 23

1.1.4. Сучасні прилади для безконтактного визначення кількісно-якісних характеристик рослинності в польових умовах …….. 25

1.2. Аналіз сучасних дистанційних методів дослідження рослинності урбанізованих територій…….……..…… 28

1.2.1. Дослідження рослинності на основі вегетаційних індексів ... 28

1.2.2. Оцінка рослинності за індексом листкової поверхні ……. 30

1.2.3. Залученя довготривалих супутникових спостережень для дослідження рослинності ……..... 31

1.3. Постановка завдань дослідження стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків …….. 33

Висновки до першого розділу……...…… 36

РОЗДІЛ 2. Розробка методів оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних

космічних знімків …….……. 37

2.1. Обґрунтування вибору космічних знімків та їх попередня обробка …….……. 37

2.1.1. Вибір космічних систем ДЗЗ та постачальників даних ...…... 38

2.1.2. Радіометричне калібрування космічних знімків…….……. 39

2.1.2.1. Радіометричне калібрування знімків супутникової системи “Січ-2” ……..…….…… 40

2.1.3. Атмосферна корекція космічних знімків та усунення перешкод …… 46

2.1.4. Класифікація космічних знімків для виділення рослинності.. 47

2.2. Метод оцінювання кількості рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків.. 49

2.2.1. Визначення залежностей між нормалізованим вегетаційним індексом та індексом листкової поверхні …… 49

2.2.1.1. Стандартні регресійні моделі …..…… 50

2.2.1.2. Апроксимація на основі оптимальної сплайн-інтерполяції …….…… 52

2.2.2. Відновлення регресійних залежностей для території досліджень ……..…….. 54

2.3. Метод оцінювання якості рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків …….. 56

2.3.1. Обґрунтування визначення показника якості рослинності за багатоспектральними космічними знімками …… 56

2.3.2. Вибір методу апроксимації спектральних кривих……. 57

2.3.2.1. Метод частково-лінійної інтерполяції …… 59

2.3.2.2. Метод поліноміальної інтерполяції …… 60

2.3.2.3. Метод сплайн-інтерполяції ……..……..…….. 61

2.3.3. Відновлення регресійних залежностей показників якості рослинності за дистанційними та наземними даними…..…….. 64

2.4. Метод виявлення просторово-часових трендів змін рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків ……. 66

2.4.1. Вплив тривалості вегетаційного періоду рослинних угруповань території досліджень ……..…….…… 66

2.4.2. Обґрунтування вибору основних показників для дослідження просторово-часових змін стану рослинності …..……. 70

Висновки до другого розділу…….……... 71

РОЗДІЛ 3. Розробка методики оцінювання кількісно-якісних характеристик рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків …….……. 72

3.1. Розробка алгоритмів оцінки кількості рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків …….……. 72

3.2. Розробка алгоритмів оцінки якості рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків ... 76

3.3. Інтегральна оцінка стану рослинності урбанізованої території 79

3.4. Розробка алгоритму аналізу часових серій багатоспектральних космічних знімків …….. 80

3.5. Розробка загальної методики автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків …….. 81

Висновки до третього розділу…….…. 83

РОЗДІЛ 4. Валідація розробленої методики та рекомендації щодо її використання ..…….. 84

4.1. Оцінка стану рослинності тестових ділянок в межах м. Києва …. 84

4.1.1. Комплекс підсупутникових спостережень на території досліджень ……... 85

4.1.2. Визначення індекса листкової поверхні за космічними знімками середньої просторової розрізненності …….…. 88

4.1.3. Визначення індекса листкової поверхні за космічними знімками високої просторової розрізненності …… 90

4.1.4. Оцінка якісного стану рослинності за багатоспектральними супутниковими знімками та наземними завірковими даними …… 94

4.1.4.1. Територія дослідження …… 95

4.1.4.2. Дані, використані в дослідженні …… 97

4.1.4.3. Розрахунки та інтерпретація результатів …… 98

4.1.5. Визначення загального показника стану рослинності для багатоспектральних зображень з супутників “Січ-2” та RapidEye... 101

4.2. Оцінка довготривалих змін рослинності київської міської агломерації ……..….. 106

4.3. Оцінка точності визначення параметрів рослинності за розробленою методикою …….. 112

4.4. Розробка рекомендацій щодо впровадження розробленої методики …. 113

Висновки до четвертого розділу…….. 116

ВИСНОВКИ…… 117

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ …..……... 121

ДОДАТКИ …….. 140

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДЗЗ	–	дистанційне зондування Землі
МНК	–	метод найменших квадратів
НПП	–	Національний природний парк
DHP	–	digital hemispherical photography
DN	–	digital number
GLA	–	gap light analyzer
LAI	–	leaf area index
LUT	–	look-up table
NDVI	–	normalized difference vegetation index
PCA	–	plant canopy analysis
REI	–	red-edge interpolation
REP	–	red edge position
RET	–	red-edge tangent
VQF	–	vegetation quality factor
UQL	–	urban quality of life

ВСТУП

Актуальність теми

Результатом сучасного розвитку міських територій стало формування особливого урбанізованого середовища, екологічний стан якого вимагає постійного вдосконалення методів контролю та оцінки наслідків урбанізації.

Екологічна криза великих міст зумовила перегляд традиційних уявлень про екосистеми та стан основного їх компонента – рослинності. На пошуки шляхів і засобів підтримки життєдіяльності рослинності, усунення ентропійних процесів, що відбуваються в урбанізованому середовищі спрямований екологічний моніторинг, що проводиться разом із загальними програмами охорони довкілля великих міст.

Значну роль в підвищенні якості умов проживання і відпочинку жителів міста відіграють зелені насадження. Тому оперативний моніторинг змін рослинного покриву урбанізованих територій дуже важливий для розробки ефективних заходів з охорони навколишнього середовища в містах.

Дослідження з дистанційного вивчення і картографування рослинності урбанізованих територій почалося ще в 1980-х роках. R.W. Miller вивчав міську рослинність та її внесок в області планування та управління міськими екосистемами [1]. W. Pillmann та K. Kellner активно використовували супутникові знімки для моніторингу міських лісів [2]. A.P. Newman визнає не тільки естетичну користь міських лісів, але й їх здатність до зберігання вуглецю, фільтрації повітря, зменшення шуму та збереження природних заповідних місць [3].

Російський учений С.А. Барталев зробив значний внесок у вивчення лісових екосистем. Так, наприклад, в дослідженні [4] наводяться результати використання даних супутникової зйомки для оцінки стану рослинності в зоні впливу джерела забруднення промисловими викидами.

В Україні дослідженням рослинності займаються такі вчені, як В.І. Лялько, Я.І. Мовчан, С.М.°Кочубей, Т.М. Шадчина, С.С. Кохан, О.І. Сахацький, та ін. [5,6]. Оцінка рослинності проводиться на основі

використання області червоного краю та спектрального коефіцієнта відбиття рослинності в ближньому інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра [7,8].

Дана робота, що базується на публікаціях [9-26], присвячена розробці методики оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків.

Актуальною науковою задачею є розробка нового підходу до оцінки поточного стану рослинності урбанізованих територій на основі даних багатоспектрального космічного знімання, який надасть можливість отримати більш інформативні показники та підвищить оперативність та достовірність інформації про стан рослинності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт, що проводились у Державній установі «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» за такими темами: «Методологія комплексного геоінформаційного аналізу матеріалів аерокосмічних спостережень землі і наземних даних в інтересах підвищення ефективності природокористування» (Державний реєстраційний номер 0111U000030); «Розробка нових методик космічного моніторингу земних покровів (рослинність, ґрунти, водні ресурси), біорізноманіття в умовах кліматичних змін з метою управління ризиками надзвичайних ситуацій» (Державний реєстраційний номер 0112U000703); «Методи дистанційного оцінювання біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів в межах різних ландшафтно-кліматичних зон території України» (Державний реєстраційний номер 0114U001664); «Оцінювання характеристик рослинних об'єктів на основі комплексування даних спектрополярізаційних вимірювань і матеріалів аерокосмічних зйомок» (Державний реєстраційний номер 0114U005060).

Мета і задачі дослідження. *Метою* дослідження є розробка методики автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з

використанням багатоспектральних космічних знімків для підвищення його оперативності, інформативності та об’єктивності.

Досягнення мети забезпечується вирішенням наступних *задач:*

– огляд існуючих методів оцінювання стану рослинності урбанізованих територій;

– розробка алгоритму розрахунку кількості рослинності з використанням багатоспектральних космічних знімків;

– розробка алгоритму розрахунку характеристик якості рослинності з використанням багатоспектральних космічних знімків;

– розробка алгоритму виявлення просторово-часових тенденцій у змінах рослинного покриву урбанізованих територій з використанням довготривалих часових серій багатоспектральних космічних знімків;

– розробка методики автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків;

– валідація розроблених алгоритмів та методики на тестових ділянках;

– розробка рекомендацій щодо практичних застосувань розробленої методики.

Об’єкт дослідження – дистанційне оцінювання стану рослинності урбанізованих територій.

Предмет дослідження – методи і алгоритми дистанційного оцінювання стану рослинності урбанізованих територій.

Методи дослідження

Для розв’язання поставлених задач використовувалися:

– теорія переносу оптичного випромінювання – для виконання радіометричної та атмосферної корекції багатоспектральних космічних зображень, а також для обчислення індекса листкової поверхні фотометричним методом;

– геометрична оптика – для визначення індекса листкової поверхні оптичним методом;

– розпізнавання образів – для проведення класифікації земних покривів на багатоспектральних зображеннях і побудови масок рослинності;

– математична статистика – для статистичної обробки результатів супутникових та наземних вимірювань, відновлення регресийних залежностей, оцінки коефіцієнтів кореляції та детермінації;

– теорія інтерполяції та апроксимації функцій – для визначення складних нелінійних залежностей між супутниковими вимірюваннями та біофізичними характеристиками рослинності, для апроксимації кривих спектрального відбиття рослинності в зоні червоного краю;

– візуальне дешифрування космічних зображень – для підготовки супутникових даних для подальшої автоматизованої обробки;

– геоінформаційні технології – для розробки закінченої методики комплексного автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків, візуалізації та картування одержуваних результатів.

Вибір та коректне застосування добре відомих та неодноразово веріфікованих методів дослідження забезпечив обгрутованість отриманих в дисертаційній роботі результатів і висновків.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. ***Вперше*** розроблено методику комплексного автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням космічних знімків, яка відрізняється від існуючих новим фізично обґрунтованим інтегральним кількісним показником стану рослинності;

2. За матеріалами багаторічних наземних завіркових вимірювань ***вперше*** для території Києва та Київської агломерації одержано статистично значимі регресійні залежності між показником кількості рослинності та вегетаційними індексами, а також між нормованою якістю рослинності за даними таксації та космічної зйомки;

3. ***Отримали подальший розвиток*** методи дистанційного оцінювання якості рослинності на основі апроксимації спектрального відбиття в області червоного краю методом оптимальної сплайн-інтерполяції;

4. Розроблено необхідні алгоритми, адаптовані до конкретних багатоспектральних сенсорів (Landsat/ETM+, Landsat/OLI, RapidEye/JSS, “Січ-2”/МСУ, Pléiades-1/VHR), отримано відповідні набори коефіцієнтів інтерполяції.

Практичне значення одержаних результатів

Розвинуто методи оперативного та об’єктивного оцінювання стану рослинності урбанізованих територій, які включають не тільки площу насаджень, але й оцінку їх якості, що є важливим для життя людини в міському середовищі.

Отримано інформаційний інструмент виявлення просторово-часових тенденцій рослинного покриву, який є корисним для підтримки науково-обґрунтованих управлінських рішень.

Розроблено цілісну геоінформаційну технологію, яка дозволяє забезпечити міську владу та осіб, які приймають рішення відносно розвитку зелених насаджень, оперативною та достовірною дистанційною картографічною інформацією про стан рослинності в місті.

Розроблену методику комплексного автоматизованого оцінювання стану рослинності з використанням космічних знімків було *впроваджено* в ДП «Дніпропетровське лісове господарство». Алгоритми дистанційного оцінювання якості рослинності на основі апроксимації спектрального відбиття в області червоного краю були використані при оцінюванні екологічного стану, здійсненні моніторингу лісів Дніпропетровщини та при плануванні науково-дослідної роботи “Екологічний та енергетичний потенціал головних лісотвірних порід Степового Придніпров’я України”.

Наукові положення та результати дисертаційного дослідження, а саме – оцінювання якісного стану рослинності за багатоспектральними супутниковими знімками та наземними завірковими даними, алгоритми оцінки кількості рослинності урбанізованих територій на основі побудови робастної регресії та використанні індексу листової поверхні були апробовані та використовуються науковим і рекреаційним відділами Національного природного парку

«Голосіївський» при оцінюванні загального екологічного стану території, стану рослинності, моніторингу змін екосистем під впливом рекреаційних навантажень та впроваджуються у наукову діяльність НПП «Голосіївський».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертації отримані здобувачем особисто. Автором особисто проаналізовано та узагальнено існуючі наукові підходи визначення стану рослинності за даними космічної зйомки та наземних вимірювань. Також дисертантом були самостійно оброблені та систематизовані матеріали власних досліджень – дані тематичного дешифрування 55 космічних знімків за період з 1992 по 2015 рр. та дані польових досліджень 2013-2014 рр. у межах 49 тестових ділянок. У процесі виконання дисертаційної роботи автором проведено аналіз наявних наземних даних – таксаційні описи та база даних, наданих НПП «Голосіївський» в рамках договору про наукове співробітництво.

В опублікованих зі співавторами наукових працях, у яких відображені основні наукові результати дисертації конкретний внесок здобувача полягав у наступному:

– у роботі [9] – запропоновано новий інтегральний показник стану рослинності, який одночасно враховує її кількість та якість;

– у роботах [17,20,23] – запропоновано моделі кількісної оцінки рослинності урбанізованих територій та перевірено на тестових ділянках;

– у роботі [13] – адаптовано моделі кількісної оцінки рослинності урбанізованих територій до супутникових даних високої просторової розрізненності;

– у роботах [12,24] – запропоновано регресійні моделі взаємозв’язку нормованої якості рослинності з результатами наземних оцінок, обчислено параметри регресії;

– у роботах [11,22] – запропоновано цілісну геоінформаційну технологію кількісно-якісного оцінювання рослинності урбанізованих територій та перевірено її на тестових ділянках;

– у роботах [10,18,19] – реалізовано методику виявлення просторово-часових трендів змін рослинності, проведено чисельні розрахунки та отримано карти розподілу параметрів довготривалих трендів;

– у роботі [14] – запропоновано та перевірено на тестовому прикладі новий спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень.

Апробація результатів дисертації

Основні теоретичні та методичні положення, висновки й попередні результати дисертаційного дослідження були представлені, обговорені та отримали схвалення на: міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 110-річчю Національного аграрного університету України «Сучасні ГІС-технології і методи дистанційного зондування Землі в агропромисловому та природоохоронному комплексах» (м. Київ, 19–20 червня, 2008 р.); всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Екологічна безпека держави» (м. Київ, 16-18 квітня, 2013 р.); XV міжнародній науковій конференції «Астрономічна школа молодих вчених» (м. Біла Церква, 15–17 травня 2013 р.); II науково-практичній конференції «Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій» (м. Київ, 10-13 червня, 2013 р); XIII українській конференції з космічних досліджень (м. Євпаторія, 2-6 вересня, 2013 р.); одинадцятій Всеросійській відкритій конференції «Сучасні проблеми дистанційного зондування Землі із космосу» (м. Москва, 11–15 листопада 2013 р.); XVI міжнародній науковій конференції «Астрономічна школа молодих вчених» (м. Кіровоград, 29–31 травня 2014 р.); четвертій міжнародній конференції «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2014», (м. Київ, 26–30 травня 2014 р.); XIV українській конференції з космічних досліджень (м. Ужгород, 8–12 вересня 2014 р.); дванадцятій Всеросійській відкритій конференції «Сучасні проблеми дистанційного зондування Землі із космосу» (м. Москва, 10-14 листопада 2014 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Інтеграція геопросторових даних у дослідженнях природних ресурсів» (м. Київ, 27-28

листопада, 2014 р.); XVII міжнародній науковій конференції «Астрономічна школа молодих вчених» (м. Житомир, 20-22 травня 2015 р.); XV українській конференції з космічних досліджень (м. Одеса, 24–28 серпня 2015 р.)

Публікації. За темою дисертації опубліковано 18 робіт, у тому числі: у фахових виданнях, що внесені до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук – 5 (з яких: 1 – виконано одноосібно, 1 – включена у наукометричні бази “РИНЦ” та Scopus); 1 патент на винахід; 12 – у збірниках матеріалів і тез доповідей вітчизняних та міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (154 найменування на 19 сторінках) і 4 додатка на 33 сторінках. Робота викладена на 172 сторінках, що містять 116 сторінок основного тексту, 45 рисунків і 11 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ РОСЛИННОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Рослинність – компонент біосфери, якому притаманні унікальні утворюючі, водозахисні, ґрунтозахисні та інші системні функції. Засвоюючи в процесі фотосинтезу двоокис вуглецю, воду, мінеральні компоненти, рослини утворюють органічні речовини – джерело енергії та їжі усіх живих організмів і виділяють життєво необхідний кисень. Значною є роль рослин в міграції хімічних елементів та у підтримці балансу існуючих в природі взаємозв’язків, а також в утворенні ґрунтів та формуванні ландшафтів. За участю рослинності формується клімат, підтримуються водний баланс і необхідний для живих організмів склад приземної атмосфери, тощо. Тому вивченню стану рослинності, достовірному і точному оцінюванню її кількісних та якісних показників приділяється велика увага [27].

1.1 Аналіз сучасних наземних методів дослідження рослинності урбанізованих територій

Озеленення міст – це комплексна проблема, яка охоплює планування, нормування, проектування, будівництво, експлуатацію озеленених територій, розвиток розсадницького господарства, виробництво малих архітектурних форм, удосконалених дорожніх покриттів, підготовку кадрів спеціалістів вищої та середньої кваліфікації, організацію науково-дослідної роботи по озелененню, вивчення та розповсюдження передового вітчизняного і зарубіжного досвіду.

Розробка питань охорони та оздоровлення міського середовища передбачає використання зелених насаджень для створення стійких фітоценозів з метою забезпечення комфортних умов проживання і трудової діяльності, акумуляції і детоксикації промислових аерозолів різної хімічної природи [28].

Зелені насадження кондиціюють повітря в процесі іонізації і виділення фітонцидів; активно очищають атмосферу, поглинаючи більшість полютантів

для побудови структурних і функціональних систем організмів; знижують силу вітру та рівень шуму; змінюють мікроклімат території.

Рослинність в міських умовах, виконує захисно-меліоративні функції при закріпленні відкосів, насипів і т.п., водозахисні і водорегулюючі функції; використовується для біологічної рекультивації порушених територій [29].

В планувальних рішеннях щодо поліпшення архітектурного вигляду міста враховується фактор зелених насаджень, які сприятливо впливають на психологічний та емоційний стан людини. У той же час, міське середовище відрізняється своєрідністю основних екологічних факторів та специфічною дією техногенних факторів, що не може не позначатися на самих різних сторонах життєдіяльності рослин.

Ослаблення і зміна сонячної радіації через задимлення та загазованість, зміна режиму тепла та вологості, ґрунтових факторів в умовах міста відбувається на тлі забруднення повітряного і ґрунтового середовища. Тому міська рослинність розвивається в екстремальних умовах, і своєчасна оцінка її стану є важливим завданням.

1.1.1. Загальні принципи та нормативні положення щодо моніторингу стану рослинності урбанізованих територій

В країнах Заходу з встановленою періодичністю в автоматичному режимі проводиться зняття параметрів стану і властивостей тих чи інших елементів природного середовища, у тому числі міських екосистем (міські ліси, парки). Інформація надходить у регіональні центри обробки, що обслуговують один або кілька штатів, та накопичується у відповідних банках даних, об’єднаних в єдину інформаційну систему. У результаті в будь-який момент може бути оперативно отримана повна картина стану середовища штату, міста, району та виявлено негативні тенденції і процеси, що дозволяють чітко фіксувати їх просторові ареали, встановити причини, розробити рекомендації з проведення захисних заходів. Служби моніторингу США регулярно інформують федеральну і регіональну владу про стан

природного середовища підвідомчих територій, яка в разі необхідності застосовує санкції щодо порушників правил експлуатації споруд, технології виробництва, забруднення міського середовища [30].

Досвід Японії в організації моніторингу міських озеленених територій багатомільйонного Токіо є дуже повчальним [31]. Ще в 1972 р. адміністрація Токіо поряд з прийняттям заходів по очищенню повітряного басейну, усуненню забруднень автотранспортом, прийняла постанову про відновлення елементів природного середовища в межах міста. Всі озеленені території було взято на облік, проінвентаризовано, складено опис рослинності, визначені ділянки для нового озеленення. Крім того, були виявлені природоохоронні зони, взяті під охорону цінні куточки природи, сільськогосподарські ландшафти, ведуться заходи щодо захисту флори і фауни. Організовано систему спостережень за рослинністю в місті, на кожен об’єкт складений паспорт з докладним описом об'єкта, балансом його території (газон, дерева, чагарники, квітники, фауна) та планом об’єкта. Велику роль у встановленні меж озеленених територій міста і передмість зіграла космічна зйомка, що забезпечила складання докладних планів міських територій з виявленням впливу антропогенних факторів на рослинність. В результаті проведених заходів до теперішнього часу рівень озеленення міських територій знаходиться в межах розрахованих екологічних нормативів і тримається на постійному рівні. На підставі перспективного плану озеленення та з урахуванням результатів моніторингу територій фахівці розробили оптимальну структуру рослинності на об’єктах озеленення з позицій економного та раціонального використання міських територій.

У сучасних екологічних умовах Києва особливого значення набувають питання утримання зелених насаджень на міських об’єктах ландшафтної архітектури – уздовж вулиць і магістралей, на територіях житлової забудови, у скверах, парках, бульварах, лісопарках та міських лісах.

Вирішення цих питань неможливе без оцінки реального стану рослинності [32].

Рослини дуже чутливо реагують на мінливі умови, а тому можуть служити індикаторами стану середовища.

На території України відносини у сфері охорони, використання та відтворення рослинного світу регулюються Конституцією України, законами України “Про охорону навколишнього природного середовища”, “Про природно-заповідний фонд України”, Лісовим кодексом України, Законом України “Про рослинний світ” та іншими нормативно-правовими актами.

Згідно з прийнятою класифікацією [33] зелені насадження поділяються за функціональною ознакою на три основні групи:

а) озеленені території загального користування: парки культури та відпочинку, парки відпочинку, сквери і бульвари, спеціалізовані парки (ботанічні сади, зоопарк, Музей народної архітектури і побуту, НК «Експоцентр України», гольф-парк);

б) озеленені території обмеженого користування – на міжбудинкових житлових територіях (внутрішньо квартальні насадження та прибудинкові смуги), ділянках землекористування дитячих закладів, шкіл, вузів, наукових і лікувальних закладів, підприємств та організацій;

в) озеленені території спеціального призначення – санітарно-захисні зони промислових підприємств, водоохоронні, меліоративні та лісозахисні смуги, оранжерейні господарства та розсадники, коридори інженерних мереж, озеленені частини вулиць, доріг і кладовищ.

Віднесення територій і об’єктів зеленої зони до відповідних груп здійснюється рішеннями Київської міської ради на підставі чинних державних будівельних норм України.

Згідно державних будівельних норм України (ДБН 360-92**), при плануванні та забудові населених пунктів потрібно керуватися наступними принципами: збереження та раціональне використання цінних природних

ресурсів; дотримання нормативів гранично допустимих рівнів екологічного навантаження на природне середовище територій з урахуванням потенційних можливостей середовища; виділення ландшафтно-рекреаційних територій та заборона на них господарського та іншого будівництва, що заважає використанню даних зон за прямим призначенням; дотримання санітарних нормативів, установка санітарно-захисних зон для охорони водойм, курортних, лікувально-оздоровчих зон, джерел водопостачання, населених місць та інших територій від забруднення та шкідливих впливів.

Планувальна структура населених пунктів формується на основі комплексної оцінки території (агрегована оцінка забруднення міського середовища, економіко-містобудівна оцінка території), що визначає пріоритетність проведення заходів по захисту навколишнього середовища, тому першочерговим завданням являється отримання оперативної та достовірної (актуальної) інформації про стан рослинності.

На сьогоднішній день Київським комунальним об’єднанням зеленого будівництва та експлуатації зелених насаджень міста «Київзеленбуд» проводиться інвентаризація зелених насаджень. При цьому необхідно визначити: площу, породний склад зелених насаджень, подеревно віковий склад, таксаційну характеристику, якісний стан, фітопатологічний стан і проектно-господарські рекомендації, що дозволить проводити моніторинг зелених насаджень, полегшить проведення доглядових робіт, робіт з ландшафтної реконструкції, нового будівництва, а також дасть змогу у міському розсаднику для вирощування саджанців декоративних дерев і кущів та насіння газонних трав проводити закладку необхідної кількості порід та асортименту.

1.1.2. Експертні методи дослідження рослинності

Важливим завданням є створення сприятливих умов для відпочинку та ефективного використання рекреаційних функцій лісопаркової частини міських насаджень [34]. Заходи з організації та ведення господарства в

зелених зонах урбанізованих територій базуються на матеріалах їх лісоінвентаризації та спрямовані на підвищення продуктивності насаджень, збереження унікальних та живописних ландшафтів, біорізноманіття, пам’яток історії та природи, охорону навколишнього природного середовища, формування дорожно-стежкової мережі та посиленні рекреаційних функцій насаджень [35]. Під час ландшафтної таксації лісопаркових частин зелених зон, поряд із загальною лісівничо-таксаційною характеристикою ділянок, дають додаткову ландшафтно-рекреаційну характеристику [36-38], яка включає ознаки, що оцінюють їх здатність виконувати рекреаційні функції: тип ландшафту, клас естетичної оцінки, пішохідної доступності, рекреаційна оцінка, додаткова оцінка, клас стійкості, стадія рекреаційної дигресії.

Методика визначення ландшафтно-рекреаційних ознак ділянок рослинності досить недосконала через суб’єктивність їхнього встановлення та відсутність причинно-наслідкових зв’язків між встановленими ознаками та доцільними заходами з підвищення ефективності рекреаційного використання зелених насаджень.

Показник стадії рекреаційної дигресії (табл.1.1) найбільш повно відображає кількісні відмінності якісного стану деревостану, підросту, підліску, а також трав’яного і мохового покриву, лісової підстилки.

При описі таксаційних (ландшафтних) виділів загальний стан, якість росту й розвитку насаджень, а також їх здатність протистояти несприятливій дії екологічних факторів характеризується класом життєстійкості насаджень (табл.1.2).

Зовнішньо життєстійкість насаджень визначається за інтенсивністю росту, густотою хвої або листя пагонів, забарвленням і щільністю крон, кількістю, розміщенням і станом підросту і підліску, проективним покриттям надґрунтового покриву, ступенем щільності і стоптаності ґрунту, наявністю механічних пошкоджень дерев, кущів тощо [39].

Таблиця 1.1.

Стадії рекреаційної дигресії (за М.І. Рисіним)

Стадія	$К_р$, %	Стан трав'яного і мохового покриву та лісової підстилки	Стан деревостану, підросту і підліску
1	до 0,05	Трав’яний і моховий покрив без змін і відповідає типу лісу. Підстилка не порушена.	Підріст і підлісок відповідають лісорослинним умовам і не ушкоджені.
2	0,06 - 0,1	Трав’яний і моховий покрив пошкоджено на значній площі. Кількість лісових та лісолугових трав зменшилась. Наявність бур'яну або лугових трав, не характерних для лісорослинних умов ділянки. Ярусність покриву ще зберігається.	Підріст і підлісок в задовільному та доброму стані. В деревостані переважають дерева доброго та задовільного стану (75-90%).
3	0,11 - 0,3	Трав'яний і моховий покрив деградує. Різко збільшилась фітомаса і чисельність бур'яну та лугових рослин. Підстилка в стадії руйнування.	Підріст, який зберігся, мало диференційований. Майже нема сходів корінних лісоутворюючих порід.
4	0,31 - 0,6	Трав’яний і моховий покрив деградує. Різко збільшилась фітомаса і чисельність бур'яну та лугових рослин. Підстилка в стадії руйнування.	Своєрідна структура біогеоценозу у вигляді чередування картин підліску і мало життєздатного підросту, обмежених галявинами і стежками.
5	0,61 і >	Трав'яний і моховий покрив, характерний для лісорослинних умов ділянки, деградував, утворений здебільшого бур'янами. Покриття та фітомаса бур'яну і лугових рослин на багато більші, ніж лісових, які збереглися лише біля стовбурів дерев.	Підріст і підлісок майже повністю відсутні. Різко збільшена освітлюваність під наметом деревостану. Дерева мають механічні пошкодження. У значної частини дерев коріння оголене і виступає на поверхню.

Таблиця.1.2

Класи життєстійкості насаджень

Клас життєстійкості	Характеристика насаджень
I	Здорові насадження з ознаками доброго росту й розвитку, з наявністю доброго за якістю і характерного для даного типу лісу підросту, підліску і мохово-трав'яного вкриття, з нормальною щільністю ґрунту. Підпад складає не більше 10 % за кількістю стовбурів і припадає на дерева IV і V класів росту. В насадженнях своєчасно проведені всі види рубок догляду.
II	Таки ж насадження як і першого класу, але відпад складає 11-20 % стовбурів. Ґрунт на стежках ущільнений. Потрібні рубки догляду і лісогосподарські заходи оздоровчого характеру.
III	Насадження з ознаками затримки росту і розвитку більше 50 % дерев, наявність пошкоджених, суховершинних і мертвих дерев 21-40 %. Підріст і підлісок пошкоджені або знищені. Грунт ущільнений на площі біль 50 %, трави місцями вибиті, склад мохово-трав'яного вкриття змінений.
IV	Насадження припинили ріст. Підріст, підлісок відсутні. Мохово-трав'яне вкриття змінене на світлолюбові дернові види з присутністю бур'янів, на частині площі трави відсутні. Ґрунт на всій площі ущільнений. Початок зміни формації. Здорових дерев у хвойних насадженнях менше 50 %, а у листяних менше 35 %.
V	Перестійні, буреломні, хворі, пошкоджені шкідниками і пожежами насадження, котрі за своїм станом створюють загрозу сусіднім насадженням як джерело інфекції. Проходить процес зміни формації. Потрібна термінова рубка за станом, меліорація ґрунтів і штучне лісовідновлення.

1.1.3. Контактні методи визначення кількісно-якісних характеристик рослинності

Контактні методи визначення кількісно-якісних характеристик рослинності вимагають часткового пошкодження або повного знищення рослин.

Так, наприклад, специфічним є визначення складу хлорофілу в листочках рослин [40]. Мова йде про середню кількість хлорофілу, що припадає на одиницю прощі зеленого листочка рослини і вимірюється в мг/см^2. Це дуже важливий показник нормального розвитку і функціонування рослини. У молодих листочках поверхнева щільність хлорофілу невелика, але з часом зростає. Чим більше вона стає, тим швидше підвищується продуктивність процесів фотосинтезу і швидкість нарощування біомаси рослини. Фахівці з фізіології рослин можуть зробити за цим показником ряд важливих висновків і, якщо потрібно, своєчасно вжити відповідних агротехнічних заходів.

Класичний метод визначення цього параметра полягає в тому, що з листя рослини пустотілої трубочкою стандартного діаметра роблять висічки з фіксованою площею, розтирають їх та готують спиртову витяжку хлорофілу. Потім заливають її в кювети і спектрофотометричним методом визначають концентрацію хлорофілу в розчині. Отримане значення перераховують в поверхневу щільність з урахуванням відомої площі висічки.

Індекс листкової поверхні *LAI* (Leaf Area Index) є важливим фітометричним показником стану рослинності, який характеризує просторовий розподіл рослинних елементів та визначається кількісно як відношення площі загальної поверхні освітлених листків до одиниці поверхні ґрунту для листяних культур:

$$LAI = S / G \quad , \tag{1.1}$$

де S – площа освітлених листків, G – площа ґрунту.

Для хвойних культур з голкоподібним листям індекс листкової поверхні визначається як відношення спроектованої площі хвойних голок до одиниці площі хвойного покриву [41].

Формально LAI – величина безрозмірна, але з фізичної точки зору вона вимірюється як $м^2/м^2$.

Зміст найбільш процедурно простого, але руйнівного методу контактних вимірювань LAI полягає в тому, що на певній земельній ділянці з рослинністю зрізують все листя, збирають і підраховують їх загальну площу з однієї сторони листа. Відношення підсумованої загальної площі зібраного листя до площі ділянки дає шукану величину індексу листкової поверхні [42]. Для хвойних культур застосовують більш складну формулу (1.2):

$$S = 5{,}14 \times L \times (a/2 + b/4), \qquad (1.2)$$

де S – площа хвоїнки, $мм^2$; L – довжина хвоїнки, мм; a – товщина хвоїнки, мм; b – ширина хвоїнки, мм.

Для визначення наведених вище параметрів хвоїнки було підібрано 7 облікових дерев в сосняку брусничному з різним ступенем товщини. У цих дерев були відокремлені модельні гілки за допомогою висотного секатора. Потім з них була обірвана вся хвоя і розділена на вікові фракції. Кожну окрему фракцію зважували на електронних вагах з точністю до 0,1 г. З кожної вікової групи було відраховано 100 хвоїнок і зважено для розрахунку маси середньої хвоїнки з точністю до 0,01 г. По масі середньої хвоїнки були обрані середні хвоїнки з кожної вікової групи і проведені заміри довжини, ширини і товщини [43].

Підрахунок загальної площі листя важко провести інакше, ніж вручну, а це вимагає великих витрат часу. Тому вказана процедура орієнтована переважно на вимірювання величини LAI для невеликих за своєю площею ділянок рослин, в основному “короткого” зростання (трав, сільськогосподарських культур). Разом з тим, відомі дослідження із застосуванням прямих наземних вимірювань для оцінювання LAI рослинності лісових масивів [44].

Головна перевага наземних прямих вимірювань – максимальна відповідність оцінок LAI дійсному стану рослинності, тому засновані на таких вимірюваннях методи зазвичай використовують для калібрування дистанційних методів і технологій вимірювання LAI [45,46].

1.1.4. Сучасні прилади для безконтактного визначення кількісно-якісних характеристик рослинності в польових умовах

На відміну від контактних методів визначення кількості рослинності, непрямі, або безконтактні, виключають безпосередню взаємодію з рослинами.

Такі методи оцінювання LAI базуються на аналізі особливостей проходження світла (сонячного та/або розсіяного атмосферою), що падає на купол дерева, через прогалини між листками. Ці особливості, у вигляді світлових сегментів і плям різних геометричних розмірів та інтенсивності, відображаються на загальній картині просторового розподілу інтенсивності світла під кроною дерева.

Відомо багато наземних способів і відповідних приладів для реєстрування картини розподілу світла і проведення необхідних світлових вимірювань [42,47,48]. Найбільш поширеними є спосіб фотографування Digital Hemispherical Photography (DHP) [49,50] і спосіб аналізу рослинного пологу Plant Canopy Analysis (PCA).

Спосіб DHP надає можливість отримати цифрове фотографічне зображення з наочною цілісною картиною розташування, форми і розмірів прогалин у листві дерева. Але для одержання такої картини фотографувати треба з-під дерева в надир і при цьому має бути охопленою уся верхня півсфера. Щоб задовольнити останню вимогу, використовують цифрову фотокамеру з об’єктивом “риб’яче око” (останній забезпечує кут поля зору у 180 градусів). Для забезпечення необхідного орієнтування у просторі та стабілізації в момент знімання фотокамеру закріплюють на тринозі.

Спосіб оцінювання LAI через вимірювання та аналіз рослинного пологу PCA реалізовано в аналізаторі Plant Canopy Analyzer LAI-2000 компанії LI-COR

Inc. [51]. Теоретичним підґрунтям даного способу є формула 1.3, яка зв'язує величину *LAI* з кількістю сумарного сонячного світла, що проходить під різними кутами через прогалини у листві дерева [47].

$$LAI = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{\Phi_0}{\Phi} \quad , \tag{1.3}$$

де Φ – освітленість під пологом дерев, Φ_0 – освітленість над деревами, μ – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність поглинання світла.

В конструкції приладу LAI-2000 передбачено п'ять кільцевих за формою чутливої площадки фотодетекторів, причому площадки утворюють концентричні кільця. На ці фоточутливі в інтервалі довжин хвиль 400–490 нм площадки за допомогою спеціальної оптики збирається світловий потік, який проходить через листву дерева під кутами від 0 до 74 градусів (рис.1.1).

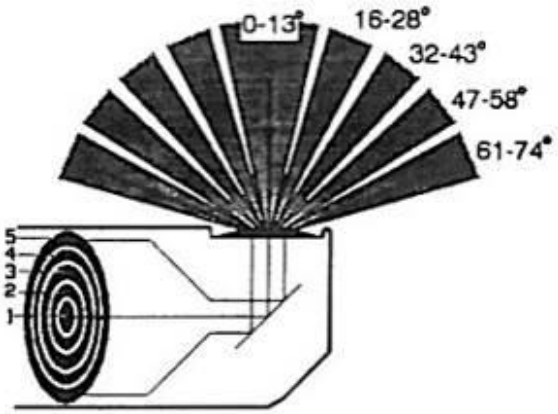


Рис. 1.1. Схема оптичного датчика LI-COR LAI-2000

Фотодетектори перетворюють величини падаючих на них світлових потоків в електричні сигнали, останні аналізуються комп'ютером на предмет виявлення та оцінювання прогалин, що дозволяє далі розрахувати величину LAI. Завдяки такій конструкції і за допомогою спеціального програмного забезпечення аналізатор Plant Canopy Analyzer LAI-2000 видає достатньо точні оцінки LAI.

На даний час компанією LI-COR Inc. випускається удосконалений аналізатор LAI-2200 в різних опціях [51].

Поряд з поодинокими приладами використовуються цілі дослідницькі системи. Так, наприклад, система Li-6400XT дозволяє проводити, як в камеральних, так і в польових умовах високоточні вимірювання газообміну рослин не пошкоджуючи при цьому зразок.

Система Li-6400XT також дозволяє користувачеві задавати і чітко контролювати показники вологості, концентрації CO2 та температури атмосфери, що оточує зразок, у вимірювальній камері. У комплекті з флуорометром є можливість на одній і тій же поверхні листя проводити синхронні вимірювання показників газообміну і флуоресценції хлорофілу [52]. Li-6400XT володіє високими показниками точності і, при цьому, низькою вагою, компактним дизайном, автономним джерелом живлення і вкрай широким, завдяки різноманітності додаткових аксесуарів, функціоналом.

Також система дозволяє вивчати ґрунтовий газообмін і дихання комах. Потужний процесор, відкритий інтерфейс з набором різноманітних портів для введення і виведення даних, програмне забезпечення з відкритим кодом, найрізноманітніші аксесуари та запчастини надають досліднику свободу в плані адаптації системи під власні потреби.

Отже, були розглянуті загальні принципи та нормативні положення щодо моніторингу стану рослинності урбанізованих територій, а також основні показники ландшафтної таксації. Зрозуміло, що безперечною перевагою всіх наземних методів оцінювання LAI є достовірність одержуваних оцінок LAI при технічній і процедурній простоті їх отримання. Але застосування наземних методів серйозно ускладнюється при оцінці рівню активності процесів фотосинтезу рослинності на достатньо великих площах, особливо в умовах обмеженого ресурсу часу. У подібних випадках все частіше звертаються до сучасних технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які дозволяють одержувати необхідні оцінки LAI шляхом формування аеро- або космічних

багатоспектральних зображень та їх послідуючого комп’ютерного аналізу [53,54].

1.2. Аналіз сучасних дистанційних методів дослідження рослинності урбанізованих територій

Характерною ознакою рослинності та її стану є спектральна відбивна здатність, що характеризується великими відмінностями у відображенні випромінювання різних довжин хвиль. Знання про зв’язок структури і стану рослинності з її відбивною здатністю дозволяють використовувати космічні знімки для ідентифікації типів рослинності та їх стану.

1.2.1. Дослідження рослинності на основі вегетаційних індексів

В даний час відомо близько 160 різних вегетаційних індексів. Вони підбираються експериментально (емпіричним шляхом), виходячи з відомих особливостей кривих спектральної відбивної здатності рослинності і ґрунтів.

Для оцінки кількості рослинності за багатоспектральними космічними знімками зазвичай використовуються різноманітні вегетаційні індекси – NDVI (normalized difference vegetation index), WDVI (weighted difference vegetation index), PVI (perpendicular vegetation index) [55] та їх похідні, більш змістовно пов’язані з фітометричними та біопродуктивними показниками – GPP (gross primary productivity), NPP (net primary productivity), FPAR (fraction of photosynthetically active radiation), LAI [56].

Розрахунок більшої частини вегетаційних індексів базується на двох найбільш стабільних (не залежних від інших факторів) ділянках спектральної кривої рослинності. На червону зону спектру (0,62-0,75 мкм) припадає максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом, а на ближню інфрачервону зону (0,75-1,3 мкм) – максимальне відображення енергії клітинною структурою листя. Тобто, висока фотосинтетична активність (пов'язана, як правило, з великою фітомасою рослинності) веде до більш низьких значень коефіцієнтів відбиття в червоній зоні спектру і великим значенням в ближній інфрачервоній.

Відношення цих показників один до одного дозволяє чітко відокремлювати рослинність від інших природних об’єктів.

Також береться до уваги [57,58] зона червоного краю в спектральному діапазоні 0,66-0,78 мкм, де для рослин характерне відчутне збільшення значень коефіцієнтів відбиття у напрямку збільшення довжини хвилі, а різка швидкість їхнього збільшення залежить від видового складу рослинного покриву [59]. Довжина хвилі, на якій швидкість зміни спектру відбиття максимальна, називається позицією червоного краю – Red Edge Position (REP) і належить до множини вегетаційних індексів червоного краю, які зазвичай визначаються за гіперспектральними даними [60]. За даними досліджень [61-66] REP є індикатором стану рослинності, а його зсуви є наслідком стресових умов росту рослин [67].

На підставі поняття червоного краю побудований найбільш популярний і часто використовуваний вегетаційний індекс – NDVI. Його значення визначаються спектральним діапазоном в інтервалі поглинання сонячного випромінювання хлорофілом і побічно розглядаються як величини, що відображають розподіл запасу надземної фотосинтетично-активної фітомаси, корелюють з індексом листкової поверхні і проективним вмістом хлорофілу в асимілюючих органах на одиницю площі поверхні (хлорофільний індекс) [68]. Остання величина може бути застосована для кількісної оцінки стоку фотосинтетичного зв’язування вуглецю рослинними угрупованнями [69].

Якість рослинності за багатоспектральними космічними зображеннями оцінюється, в основному, за вмістом важливих для життєдіяльності пігментів, перш за все – хлорофілу, а також каротиноїдів, антоціанів і флавоноїдів [70]. Дистанційна оцінка вмісту пігментів базується на аналізі спектральних характеристик відбиття живого листя рослин у видимому та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах [71], причому достовірність цього оцінювання залежить від точності відновлення спектральної кривої відбиття рослинності та її похідних [72]; вологовміст рослинності, який визначається температурою та відбиттям рослинного покриву в середньому інфрачервоному

діапазоні [73]; узагальненні показники здоров’я рослинності – фотосинтетична активність та стрес, які досліджуються, як правило, за допомогою спеціальних вегетаційних індексів – SIPI (structural independent pigment index) [74], PSRI (plant senescence reflectance index) [75], DSWI (disease water stress index) [76] та багатьох інших, або спеціалізованих ортогональних перетворень, таких як KTTCT (Kauth-Thomas tasseled cap transformation) [77].

1.2.2. Оцінка рослинності за індексом листкової поверхні

Проективне покриття ґрунту рослинністю та індекс листкової поверхні являються важливими кількісними характеристиками природних об’єктів, які можуть бути оцінені дистанційно [78].

В основі застосування методів дистанційного оцінювання індексу листкової поверхні, як кількісного показника, за багатоспектральними даними супутникової зйомки лежить явище спектрально-вибіркової реакції рослинності на падаюче оптичне випромінювання. Така вибірковість фіксується на багатоспектральних аерокосмічних зображеннях ландшафтів з рослинністю і може бути оцінена за допомогою вегетаційних індексів.

Загальна схема отримання дистанційної оцінки LAI через вегетаційні індекси базується на побудові формули регресії. Так, проведене [79] дослідження на знімках Landsat-5, показало, що значення NDVI і LAI добре корелюють між собою, а цей статистичний зв’язок може бути із задовільною точністю описаний формулою логарифмічної регресії.

В роботі [80] встановлено, що точність оцінок LAI у деяких випадках може бути покращена, якщо розраховувати LAI через індекс RSR (reduced simple ratio). Однак нещодавно було показано [81], що реальним є подальше підвищення точності оцінок LAI за допомогою знімків Landsat-7, якщо є адекватна модель формування оптико-спектрального сигналу та можливість додатково використовувати деякі програмні продукти, що створюються на основі багатоспектральних зображень з космічного апарату MODIS.

Для розрахунків LAI в програмних продуктах EOS/MODIS [82] багато років застосовується індекс EVI (enhanced vegetation index), оскільки він менш чутливий до негативного впливу випромінювання атмосфери та ґрунту.

З появою гіперспектральних аерокосмічних бортових засобів стало можливим синтезування нових різноманітних вегетаційних індексів й завдяки цьому одержання значно більш повної інформації про реакцію рослини на падаюче оптичне випромінювання. Важливо також, що вегетаційні індекси на основі гіперспектра виявилися не такими чутливими до геометрії рослинності, як вегетаційні індекси на основі сигналів багатоспектральних зображень. В результаті, як показано в роботах [83,84], досягається підвищення точності оцінок LAI.

1.2.3. Залучення довготривалих супутникових спостережень для дослідження рослинності

Використання даних супутникових спостережень є одним з ефективних шляхів вивчення трансформацій рослинності на великих територіях, що відбуваються під впливом кліматичних змін. Використання радіометра AVHRR з супутників серії NOAA, що забезпечує спостереження з просторовим дозволом близько 1 км, дозволяє сформувати ряди найбільш тривалих у часі глобальних наборів даних, що охоплюють період з початку 1980-х років по теперішній час [85]. Нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI, що одержаний за результатами супутникових вимірів спектрально-відбивних характеристик поверхні і тісно корелює з об’ємом зеленої біомаси, служить основою для оцінки сезонної і багаторічної динаміки рослинного покриву.

Також для оцінювання кількісно-якісних характеристик природних об'єктів використовуються продукти низки сенсорів низької та середньої просторової розрізненості: EOS/MODIS, Envisat/MERIS, SPOT/Vegetation, Sentinel/MSI [86]. Найбільший спектр інформаційних продуктів отримують на основі багатоспектральних даних спектрорадіометрів MODIS, встановлених на борту супутникової системи спостереження Землі EOS. Ця система дозволяє

здійснювати щоденний оперативний моніторинг всієї поверхні планети [82].

Продукт MOD15 Leaf Area Index & FPAR (Індекс листкової поверхні / доля фотосинтетично активної радіації) використовується для розрахунку поверхні фотосинтезу, випаровування, чистої первинної продукції, які, у свою чергу, використовуються для розрахунку земної енергії, вуглецю, процесів кругообігу води та біогеохімічних процесів в рослинності [87].

Наявність зазначених наборів супутникових даних сприяло виконанню ряду досліджень з оцінки багаторічної динаміки рослинності, в тому числі, в північних широтах, де спостерігається найбільш істотне потепління клімату [88]. Дослідження виявили наявність статистично значущих трендів значень вегетаційного індексу в різних типах екосистем, а також трендів тривалості вегетаційного сезону, що просторово корелюють з територіями значущих кліматичних змін [89, 90].

Довготривалі супутникові спостереження середнього просторового розрізнення, зокрема функціонуючої з 1984 р. супутникової системи Landsat (http://landsat.gsfc.nasa.gov/), дозволяють виявляти і прогнозувати зміни рослинного покриву та екологічного стану урбанізованих територій.

Задачею аналізу часових рядів є виявлення характерних особливостей еволюція (динаміка) часового ряду, яка обов’язково має функціональну залежність від різних факторів впливу на систему. Динаміка часового ряду містить декілька компонентів, які являють собою прояви різного впливу на систему і є складовими часового ряду [91]:

- тренд – загальний характер еволюції часового ряду, напрям його зміни, що зберігається впродовж тривалого проміжку часу або впродовж усього проміжку, що аналізується;
- циклічні коливання – більш швидка зміна динаміки ряду, для якої характерні фази підвищення і пониження;
- сезонні коливання – зміни динаміки, пов’язані із природними циклічними процесами (зміна часу доби, пори року);

▪ випадкові флуктуації – безсистемні коливання часового ряду високої частоти та малої амплітуди, пов’язані із постійним впливом на систему різних подій та процесів на досліджувану величину.

▪ викиди – стрибкоподібні потужні та короткотривалі зміни динаміки часового ряду, які значно відхиляють значення досліджуваного параметра від загальної закономірності розподілу часового ряду.

Як правило, при аналізі часових рядів дистанційних даних, виявляються та описуються тренди та періодичні складові. Лінійні тренди часових рядів дистанційних даних описуються середніми значеннями за весь період аналізу та середніми приростами за певний період. Періодичні складові описуються частотою виникнення періодичних коливань, їх внеском в досліджуваний процес що характеризується приростом функції (параметра процесу, що досліджується) кожного періоду, на які припадає коливання та характерним періодом, на який з-поміж інших припадає найбільш значне коливання.

Отже, на сьогодні розроблено достатньо багато методів дистанційного оцінювання рослинності урбанізованих територій із застосуванням багатоспектральних та гіперспектральних аерокосмічних знімків.

1.3 Постановка завдань досліджень стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків

За результатами спеціалізованої обробки багатоспектральних космічних зображень можливо визначати загальну площу проективного покриття рослинності, визначати її кількість та якісний стан [9]. Об’єктивне оцінювання стану рослинності є ефективним інструментом екологічної індикації природного міського середовища [92] і опису загальної якості життя в місті за допомогою інтегральних показників, подібних UQL (urban quality of life) [93].

Але до сьогодні ще не розроблено цілісної комплексної методики або геоінформаційної технології, яка дозволяла б об’єктивно, достовірно та оперативно оцінювати стан рослинності урбанізованих територій на основі певного єдиного інтегрального показника, що враховував би не тільки кількість,

адже і якість рослинних насаджень. Розроблення та валідація такої комплексної методики і є основною задачею даної дисертаційної роботи.

Для розроблення комплексної методики автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків необхідно провести ряд наукових досліджень у відповідності до схеми, представленій на рис.1.2.

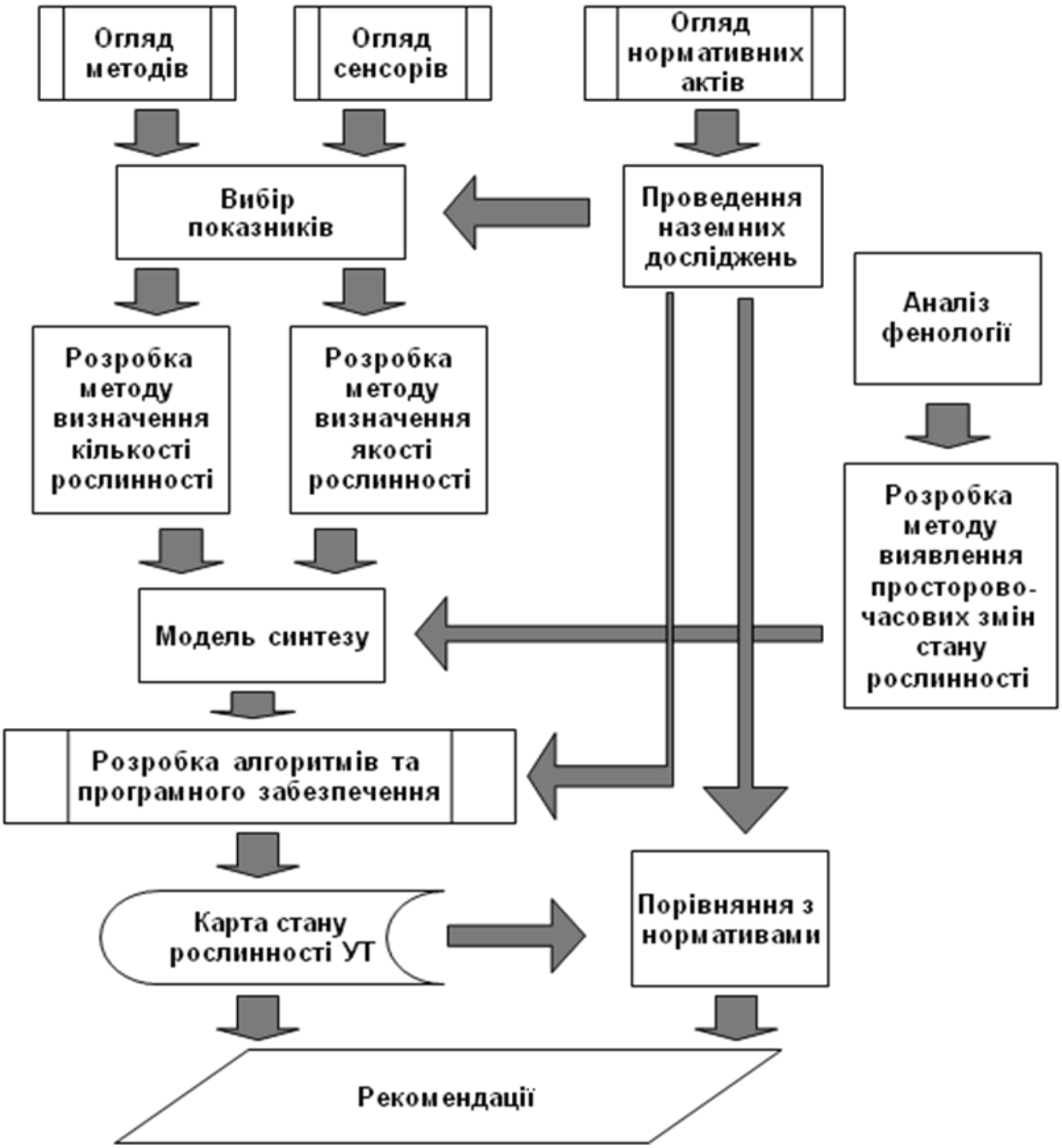


Рис.1.2. Загальна схема проведення дослідження

Основою для подальших досліджень має стати проведений огляд існуючих методів та технічних засобів для дистанційного оцінювання стану рослинності. На основі проведеного аналізу визначаються інтегральні кількісні показники стану рослинності, які можна обчислити дистанційно. Водночас проводиться аналіз чинних нормативних актів та запроваджується комплекс наземних досліджень, необхідних для визначення стану рослинності з використанням багатоспектральних космічних знімків. Після вибору інтегральних показників стану рослинності розробка необхідних методів розділяється на розробку методів визначення кількості рослинності та розробку методів визначення якісного впливу рослинності. Для більш повноцінного та достовірного визначення стану рослинності має враховуватися характер фенологічних та інших змін рослинного покриву, що потрібує використання довготривалих рядів космічних зніcків. Наприкінці всі розроблені методи синтезується до єдиної загальної моделі визначення стану рослинності. Наступним кроком буде розробка алгоритмів та необхідного програмного забезпечення для впровадження зазначеної моделі із залученням даних наземних досліджень. Результатом обробки зображень за цими алгоритмами буде карта стану рослинності урбанізованої території. Надалі, в процесі її порівняння з нормативними оцінками стану рослинності, будуть розроблені рекомендації щодо запровадження супутникового моніторингу, утримання та розвитку зелених насаджень урбанізованих територій.

Отже, результатом розроблення комплексної методики автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій стане певний геоінформаційний продукт, який базується на використанні багатоспектральних космічних знімків та наземних завіркових даних. Також загальна методика включатиме в себе дослідження кількісних та якісних характеристик рослинності та їх змін з плином часу.

Висновки до першого розділу

1. Проведений аналіз сучасних наземних методів оцінки стану рослинності урбанізованих територій. Виявлено що вони досить трудомісткі та недостатньо оперативні і не враховують загальну кількість та якість рослинності.

2. Проведений аналіз сучасних дистанційних методів оцінки стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних та гіперспектральних даних. Обґрунтовано принципову можливість застосування багатоспектральних супутникових даних для підвищення інформативності та оперативності оцінювання інтегрального стану рослинності урбанізованих територій.

3. Визначено завдання на дослідження та сформована загальна схема проведення дослідження, яка включає в себе проміжні методики визначення кількісних та якісних показників рослинності, аналізу довготривалих часових серій багатоспектральних космічних знімків та комплекс польових завіркових досліджень.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ РОСЛИННОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

Для підвищення оперативності, інформативності та автоматизації оцінювання кількості та якості рослинності необхідне залучення дистанційних (супутникових або авіаційних) даних, зокрема багатоспектральних зображень. При їх обробці можливо не тільки підвищити швидкість визначення загальної площі (проективного покриття) озеленених територій, але й отримати більш інформативні та надійні показники стану рослинності урбанізованих територій.

Таким чином запропонована концептуальна модель оцінки стану рослинності урбанізованих територій та введено показник $F(A)$, який за формулою (2.1) враховує її кількість через використання індексу листкової поверхні [17] та якість на основі апроксимації спектрального відбиття в області червоного краю [10].

$$F(A) = \int_{a \in A} S(a)\, L(a) V(a)\, da \quad , \tag{2.1}$$

де $S(a)$ – площа рослинності в елементарній ділянці території a (кв.м) в межах повної території дослідження A, $L(a)$ – значення індексу листкової поверхні в елементарній ділянці території a, $V(a)$ – нормована якість рослинності в елементарній ділянці території a.

Для реалізації розрахунків за формулою (2.1) необхідно: обґрунтувати вибір космічних знімків в залежності від виконуваних задач та провести їх попередню обробку, яка включає в себе наступні кроки: радіометричне калібрування, атмосферну корекцію, усунення перешкод та класифікацію.

2.1. Обґрунтування вибору космічних знімків та їх попередня обробка

В даний час дані ДЗЗ з космосу широко застосовуються для вирішення різних прикладних задач, кожна з яких висуває свої специфічні вимоги до

характеристик знімків і самих знімальних систем – наприклад, частота і регулярність зйомки (моніторинг), висока просторова і радіометрична розрізненність (детальне оцінювання).

Ретельне вивчення особливостей знімків, отриманих різними сенсорами, правильність вибору програмного забезпечення, відповідність вихідних матеріалів поставленим завданням мають бути запорукою успішної обробки матеріалів космічної зйомки, а потім і отримання на її основі необхідних прикінцевих даних.

2.1.1. Вибір космічних систем ДЗЗ та постачальників даних

Для дослідження стану рослинності урбанізованих територій на основі даних ДЗЗ доцільно використовувати такі критерії відбору космічних знімків:

- стабільність отримання нових знімків та кількість архівних даних, достатня для проведення аналізу довготривалих змін стану рослинності;
- основний діапазон дат зйомки має припадати та вегетаційний період основних видів рослинності досліджуваної території;
- прийнятні спектральні характеристики та просторова розрізненність (таб. 2.1);
- хмарність космічного знімку або його фрагменту, що досліджується, не перевищує 5%.

Таблиця 2.1

Характеристики основних знімків, які прийнятні для оцінки рослинності

Супутник	Просторова розрізненність, м	Спектральний діапазон	Періодичністьзйомки однієї території, діб
Pléiades-1A	2,8 (2,0)*	B,G,R,NIR	1**
Kompsat-3	2,8	B,G,R,NIR	3
RapidEye	6,5 (5)*	B,G,R,RE,NIR	1
Січ-2	8,2	G,R,NIR,SWIR	5
Landsat-5, 7	30	B,G,R,NIR,SWIR	16
EO-1/ALI	30	B,G,R,NIR,SWIR	16**

* – після обробки, ** – в залежності від ширини області зйомки

При вирішенні задач на локальних ділянках невеликої площі (в межах міських районів та кварталів), що потребують високої оперативності слушно використовувати космічні знімки високої просторової розрізненності Pléiades-1A та Kompsat-3.

Для дослідження території цілого міста та змін за невеликий проміжок часу (напротязі року або декількох) корисні знімки середньої просторової розрізненності, такі як RapidEye та Січ-2. Наявність у знімків RapidEye каналу кромки червоного (red-edge) надає додаткову можливість оцінки якісних змін стану рослинності.

Сталість поставки, вивірена методика калібрування та корекції, велика база архівних даних та вільний доступ роблять знімки Landsat зручним інструментом для дослідження змін стану рослинності на протязі тривалих проміжків часу (десятки років).

Якість вирішення поставлених задач та отримання достовірних результатів залежить від правильності вибору знімків та проведення операцій з їх попередньої обробки: радіометричного калібрування, атмосферної корекції, усунення перешкод, класифікації, тощо.

2.1.2. Радіометричне калібрування космічних знімків

Спектральні дані, отримані за допомогою супутникових сенсорів, перебувають під впливом ряду факторів, таких як атмосферне поглинання та розсіювання, геометрія освітлення об’єкту зондування, процедура калібрування та обробки зображень, які як правило змінюються з плином часу [94]. Об’єкти зондування відзняті в різні дати надзвичайно різноманітні та їх майже неможливо порівняти в автоматичному режимі [95]. Для того, щоб виявити справжні зміни ландшафту, на які вказують зміни в поверхневому відбитті супутникових зображень, необхідно проводити їх радіометричну корекцію.

Для приведення до єдиної системи фізичних показників дані багатоспектрального супутникового зображення перераховуються з *DN* (digital

numbers) на реальні значення випромінювання на апертурі сенсора за допомогою основної формули (2.2):

$$B_\lambda = K_\lambda \times DN + C_\lambda \quad , \tag{2.2}$$

де B_λ – енергетична яскравість для спектральної зони λ, DN – вихідні значення яскравості, K_λ – калібрувальний коефіцієнт підсилення (gain), C_λ – калібрувальна константа зміщення (offset), відповідає мінімальній величині яскравості, що реєструється.

Для переважної більшості операційних супутникових систем ДЗЗ параметри gain та offset постачаються в метаданих для кожного окремого каліброваного космічного знімка.

Окремий випадок складають знімки від української супутникової системи ДЗЗ “Січ-2”. Хоча вони й надаються каліброваними до рівня L1A [96], параметри калібрування змінюються від знімка до знімка, тому для їх практичного використання в дослідженні потрібна радіометрична перекалібровка.

2.1.2.1 Радіометричне калібрування знімків супутникової системи “Січ-2”

При визначені спектральної енергетичної яскравості оптичного випромінювання L_j в робочому спектральному діапазоні (2.3) використовується спектральна чутливість $S_j(\lambda)$ багатоспектральної знімальної апаратури [97,98]:

$$L_j = \int_0^\infty L(\lambda)\, S_j(\lambda)\, d\lambda \quad , \tag{2.3}$$

де $L(\lambda)$ – спектральна густина енергетичної яскравості оптичного випромінювання на вході сенсора, Вт/(м^2·мкм·ср); j – номер робочого спектрального діапазону.

Кожному робочому діапазону j сенсора “Січ-2” відповідає спектральна чутливість $S_j(\lambda)$. Якщо на поверхні об’єкта зйомки забезпечується спектральна енергетична опроміненість $E_0(\lambda)$, то зареєстрована спектральна яскравість (2.3) складе:

$$L_j = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} E_0(\lambda)\, \rho(\lambda)\, \tau(\lambda)\, S_j(\lambda)\, d\lambda + L_{0j} \quad , \tag{2.4}$$

де $\rho(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения объекта съёмки, $\tau(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери, L_{0j} – енергетична яскравість атмосферної димки в робочому спектральному діапазоні [99].

Перехід від супутникових вимірювань спектральної яскравості на сенсорі до спектрального відбиття $\rho(\lambda)$ тестових об’єктів потребує використання результатів розв’язку рівняння переносу випромінювання [100]:

$$\rho(\lambda) = \frac{\pi(L(\lambda) - L_0)}{\tau(\lambda) \exp\left[\dfrac{\ln \tau(\lambda)}{\sin\theta}\right] E_0(\lambda) \cos\left(\dfrac{\pi}{2} - \theta\right)} \quad , \tag{2.5}$$

де θ – кутова висота Сонця над горизонтом під час зйомки.

Оскільки реальна ширина робочих спектральних діапазонів “Січ-2” не дуже велика, то спектральну енергетичну опроміненність $E_j = \dfrac{1}{\Delta\lambda_j} \int_{\lambda_j} E_0(\lambda) d\lambda$ і спектральне пропускання атмосфери $\tau_j = \dfrac{1}{\Delta\lambda_j} \int_{\lambda_j} \tau(\lambda) d\lambda$ в першому наближенні можна вважати постійним [101]. Тоді

$$L_j = \frac{\tau_j E_j}{\pi} \int_0^{\infty} \rho(\lambda)\, S_j(\lambda)\, d\lambda + L_{0j} \quad . \tag{2.6}$$

Незалежні від об’єктів знімання параметри τ_j та E_j, або відповідне останньому $L_j = \frac{E_j}{\pi}$ можливо розрахувати для конкретної знімальної системи заздалегідь. Зокрема, для “Січ-2” їх наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Знімальні параметри спектральних каналів супутникової системи “Січ-2”

Спектральний канал “Січ-2” j	Номінальне $\Delta\lambda_j$, нм	τ_j	L_j, Вт/(м^2·мкм·ср)
1	500-590	0,897	36,463
2	610-680	0,932	42,544
3	790-890	0,955	34,221

Величину спектрального відбиття тестових об’єктів $\rho(\lambda)$ можна отримати шляхом незалежних наземних вимірювань польовим спектрометром (рис. 2.1).

Рис. 2.1. Портативний польовий спектрометр при проведенні підсупутникової радіометричної калібровки системи “Січ-2”

Через рівняння радіаційного переносу (2.6) стає можливим розрахувати сигнал на сенсорі. Ця процедура повторюється для кожного спектрального каналу.

Так як відомі криві спектральної чутливості сенсора, за якими можна вирахувати середнє значення сигналу, а вимірювання приладом FieldSpec охоплюють всі робочі спектральні діапазони супутникової системи “Січ-2”, то можливо перерахувати виміряний прецизійний спектр об’єкта $\rho(\lambda)$ на спектральний коефіцієнт відбиття ρ_i в будь-якому діапазоні“Січ-2”.

Спектральні характеристики чутливості робочих діапазонів багатоспектральної супутникової системи “Січ-2”, отримані в лабораторних умовах також відомі – рис. 2.2 [102]:

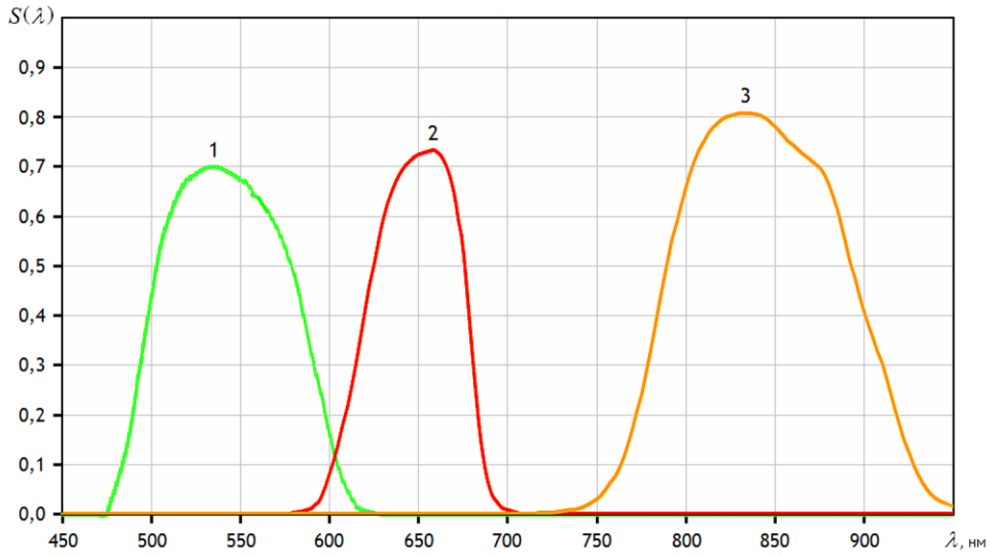


Рис.2.2. Лабораторні спектральні чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи “Січ-2”

Для проведення радіометричної калібровки рекомендується обирати спеціальні тестові об’єкти:

- великі стабільні гомогенні покриття, які на земній поверхні займають не менше 10×10 проекцій пікселів;
- отримання з кожного об’єкту від 30 до 100 відліків для забезпечення достатньої статистики вимірювань;

▪ тестові об’єкти у сукупності мають забезпечувати макимально можливий діапазон яскравостей.

Отже за результатами вимірювань L_j і одержуваних зі знімку цифрових значень *DN* стає можливим провести радіометричне калібровуння сенсора. Задачею радіометричного калібрування сенсора є уточнення коефіцієнтів перерахунку цифрових значень *DN* градацій сигналу вихідних зображень на абсолютну фізичну величину – спектральну щільність енергетичної яскравості *L* на апертурі сенсора, виміряною у Вт/(м^2·мкм·ср). Основні роботи з калібрування мають виконуватися до запуску в лабораторних умовах [103].

Важливішою вимогою до калібрувальної характеристики супутникових сенсорів є її лінійність [104].

Лінійну калібрувальну характеристику можна описати залежністю між вхідною *DN* і вихідною *L* величинами у вигляді [105]:

$$L = b \cdot DN + a \quad , \tag{2.7}$$

де *b* і *a* – калібрувальні коефіцієнти, підсилення (gain) та зміщення (offset).

Алгоритм 1.1. Радіометричне калібрування сенсора “Січ-2”.

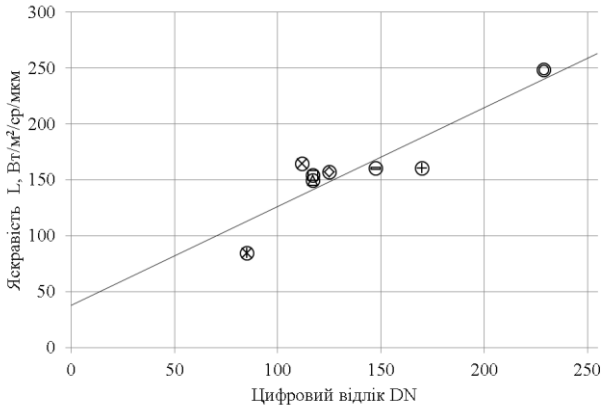
За наявністю декількох (не менше тридцяти) вимірювань при різних рівнях радіометричного сигналу стає можливим отримати калібрувальну характеристику сенсора.

Вхідними даними алгоритму калібрування сенсора є набір вимірювань значень зареєстрованої спектральної щільності енергетичної яскравості *L*, Вт/(м^2·мкм·ср), та зареєстрованих значень *DN*. Оскільки безпосередні значення величини *L* на борту “Січ-2” не надаються, то їх слід одержувати з розв’язку рівнянь радіаційного переносу. Для обчислення спектральної щільності енергетичної яскравості зареєстрованого спектрорадіометром сигналу за формулою (2.6) необхідна відносна спектральна чутливість сенсора в робочому спектральному діапазоні $S(\lambda)$.

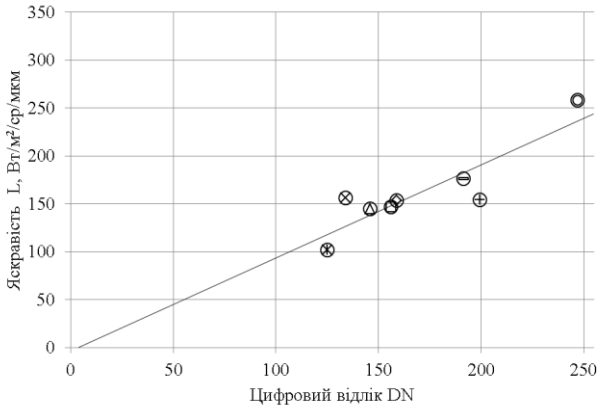
За одержаними відліками відомих *L* і *DN* відновлюються значення калібрувальних коефіцієнтів *a* і *b* в формулі (2.7).

Для мінімізації неминучих похибок вимірювань рекомендується робити їх кількість свідомо більшою за число невідомих – *b*, *a* – та розв’язувати надмірну систему рівнянь методом найменших квадратів [106].

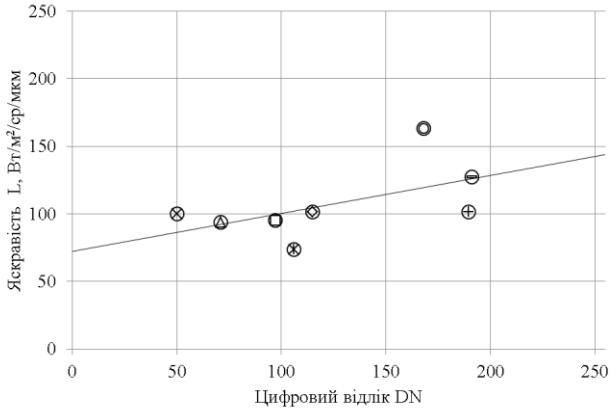
На рис. 2.3 показано результати радіометричного калібрування спектральних каналів супутникової системи “Січ-2” [107].



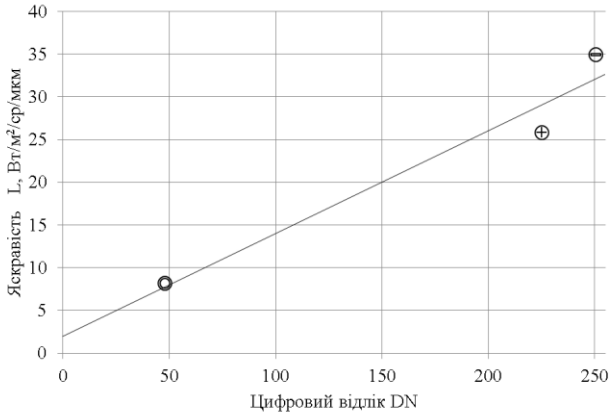
Калібрування каналу Green



Калібрування каналу Red



Калібрування каналу NIR



Калібрування каналу SWIR

Рис.2.3. Калібрувальні залежності супутникової системи “Січ-2”

В додатку Б.1 наведено програмний код розрахункового скрипта, що реалізує алгоритм калібрування в обчислювальному середовищі SciLab. За

наявністю декількох робочих спектральних діапазонів сенсора калібрування має проводитися в кожному з них окремо.

2.1.3. Атмосферна корекція космічних знімків та усунення перешкод

Одним з важливих етапів попередньої обробки космічних знімків є атмосферна корекція. В даний час, велика частина даних потрапляє до кінцевого користувача вже атмосферно скоригованою. Однак, у зв’язку з тим, що процес корекції великих обсягів даних повністю автоматизований, алгоритми які використовуються розраховуються виходячи з усереднених показників і не враховують особливості отримання кожного конкретного знімка.

В атмосфері Землі можуть виникати різні оптичні перешкоди – в основному хмарність та аерозолі, що можуть зробити неможливою або суттєво ускладнити обробку знімків. Надалі такі перешкоди має бути усунено до початку аналізу даних.

Для знімків із супутників серії Landsat був розроблений алгоритм автоматичної оцінки хмарності ACCA (англ. Automatic Cloud Cover Assessment). Цей алгоритм дозволяє класифікувати різні області знімка і створити з них маску. В якості вхідних даних алгоритм використовує дані Landsat-4,5/TM та Landsat-7/ETM+, перетворені на спектральну відбивну здатність. На виході отримується маска хмарності [108].

Алгоритм складається з двох кроків: на першому кроці аналізуються другий, третій, четвертий, п’ятий та шостий спектральні канали і визначаються наступні класи областей: холодна хмара, тепла хмара, тіні, можливо хмара, не хмара. На другому кроці аналізується лише шостий (тепловий) канал і області, які на попередньому кроці не отримали однозначної оцінки. У підсумку формується маска хмарності, в якій можуть бути присутні будь-які з вищезазначених категорій хмарності.

У процесі виконання першого кроку алгоритму збирається статистика по областях, які відповідають різним типам поверхні Землі. Наприклад, розраховується відсоток снігу на знімку, відсоток пустель та скель і так далі. На

підставі цієї статистики робиться висновок, чи потрібно переглядати області, що помічені як теплі хмари. У разі якщо на знімку більше 1% площі займає сніг, то всі ділянки з теплими областями позначаються як “можливо хмара” і аналізуються повторно. Якщо на знімку є пустелі, то їх відсоток теж враховується. Другий крок виконується за трьох умов:

- площа пустель займає більше 50% знімка,
- на знімку більше 0,4% холодних хмар,
- середня температура хмар менше 295 К.

Якщо умови не виконуються, то аналіз температури оминається і другий крок завершується.

Аналіз температури полягає в порівнянні температури областей, які переглядаються, з двома значеннями. Ці значення беруться з гістограми, яка будується на першому кроці за температурними даними. Перше значення – це температура на 83,5% (нижній поріг) гістограми, друге – на 97,5% (верхній поріг). Якщо температура області вище верхнього порогу, то робиться висновок що це не хмара. Якщо нижче, то значення температури порівнюється з нижнім порогом. Ті області, температура яких нижче, позначаються як холодні хмари, в іншому випадку вони позначаються як теплі хмари. Далі маска хмарності в остаточному вигляді зберігається.

2.1.4. Класифікація космічних знімків для виділення рослинності

Для виділення основних класів рослинних біотопів для території досліджень проводиться класифікація космічних знімків.

Найпростішим методом класифікації є застосування дерева рішень (порогового вирішального правила за вегетаційним індексом NDVI) та розподіл зображення на два класи – “рослинність” та “не рослинність”. Результатом класифікації буде маска рослинності.

Окремим випадком є попереднє застосування маски рослинності до досліджуваного зображення з проведенням подальшої класифікації.

При відсутності достовірних завіркових даних для території досліджень, таких як наземні вимірювання, польове спектрометрування, і т. д., на першому етапі обробки багатоспектрального знімку проводиться попередня некерована класифікація за одним з відомих алгоритмів кластеризації, таких як IsoData або K-Means [109]. В результаті всі пікселі зображення розділяються на групи (кластери), критерієм виділення яких слугує подібність спектральних характеристик.

Наступним кроком на основі фізико-географічного опису району досліджень та попередньої класифікації проводиться дешифрування знімку. Для завірки можуть використовуватись знімки високої просторової розрізненності демонстраційного характеру, наприклад, отримані через сервіс Google Earth (http://earth.google.com).

В залежності від території та об’єктів дослідження обираються основні робочі класи, наприклад, такі як: хвойні та листяні ліси, трав'яна рослинність, відкритий ґрунт, площі зі штучним покриттям. Для кожного визначеного класу в межах 5-10 пікселів потрібно набрати не менше 30-ти еталонних ділянок. Далі, з використанням набраних еталонів, проводиться керована класифікація одним з відомих методів – мінімальної відстані, спектрального кута, опорних векторів, тощо [110]. Зокрема, для найбільш розповсюдженого методу максимальної вірогідності (maximum-likelihood estimation – MLE) класифікація виконується за формулою (2.8):

$$L(x) = \prod_{i=1}^{n} p(y_i \mid x) \quad , \tag{2.8}$$

де $L(x)$ – значення дискримінантної функції вирішального правила вектора багатоспектральних вимірювань x, $p(y_i|x)$ – густина імовірності розподілу класу і, що описується вектором параметрів y_i [111].

Отриманий в результаті класифікації графічний розподіл робочих класів проходить пост-обробку [112], в результаті якої формуються прикінцеві класи,

що відображають розподіл типів рослинного покриву в межах території досліджень.

Отже, важливим компонентом дослідження, який впливає на здатність вирішення поставлених завдань є ретельний вибір та коректна попередня обробка космічних знімків.

2.2. Метод оцінювання кількості рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків

Кількісним показником стану рослинності було обрано індекс листкової поверхні LAI, тому що він має чітку геометричну інтерпретацію і водночас є одним з основних показників активності процесів фотосинтезу. Ще у середині минулого століття він застосовувався [113] для кількісного оцінювання фотосинтезуючої здатності листя і виявився за своєю інформативністю і об’єктивністю одним з найбільш цінних морфоструктурних параметрів рослинних екосистем.

2.2.1. Визначення залежностей між нормалізованим вегетаційним індексом та індексом листкової поверхні

Індекс листкової поверхні LAI є ключовою змінною, яка функціонально пов’язана зі спектральним коефіцієнтом відбиття. Встановлено велику кількість відносин між різними вегетаційними індексами та LAI. При оцінці визначення LAI більшість вегетаційних індексів залежать від внутрішніх чинників, таких як видовий склад рослинності, геометрія пологу, оптичні властивості листя та ґрунту, або зовнішніх факторів, таких як положення сонця та хмарність [114].

Оскільки індекс листкової поверхні добре корелює з вегетаційними індексами, основним методом визначення кількості рослинності є використання таблиці відповідності регресійної залежності між нормалізованим вегетаційним індексом NDVI та LAI. Використовується метод з відновленням регресійних залежностей для певної території досліджень з урахуванням фенологічних особливостей рослинності та кліматичних умов.

2.2.1.1. Стандартні регресійні моделі

Загальна *регресійна модель* описується формулою:

$$y = f(x,b) + \varepsilon\,,\ \mathrm{E}(\varepsilon) = 0\,, \tag{2.9}$$

де b – вектор параметрів моделі, ε – випадкова помилка моделі (залишок).

Найчастіше використовують лінійну, поліноміальну, логарифмічну, експонентну, показникову типи регресії [115].

При використанні *лінійної* регресії взаємозв'язок між даними описується за допомогою лінійних функцій, а невідомі параметри моделі оцінюються за вхідними даними. Лінійна функція регресії $f(x,b)$ у виразі (2.9) набуває вигляду

$$f(x,b) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \ldots + b_k x_k\ , \tag{2.10}$$

де b_j – параметри (коефіцієнти) регресії, x_j – регресори (фактори моделі), k – кількість факторів моделі.

Поліноміальна регресія означає наближення даних поліномом k-й ступені

$$f(x,b) = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \ldots + b_k x^k\ , \tag{2.11}$$

де b_j – параметри (коефіцієнти) регресії, x_j – регресори (фактори моделі), k – кількість факторів моделі.

При $k=i$ поліном є прямою лінією, при k=2 – параболою, при k=3 – кубічною параболою і так далі. Для побудови регресії поліномом k-й ступені необхідна наявність хоча б k+1 точок даних.

Логарифмічна регресія зазвичай застосовується при моделюванні характеристик, значення яких спочатку швидко міняються, а потім поступово стабілізуються. Регресія будується відповідно до рівняння:

$$f(x,b) = b_0 + b\ln(x) \ , \tag{2.12}$$

де b_0, b – параметри (коефіцієнти) регресії.

Експонентну регресію використовують у випадку, якщо швидкість зміни даних монотонно зростає. Регресія будується відповідно до рівняння

$$f(x,b) = a \cdot e^{bx} \ , \tag{2.13}$$

де a, b – коефіцієнти регресії.

Основними показниками якості регресійної моделі є [116] залишкова сума квадратів відхилень, оцінка дисперсії похибки, оцінка дисперсії прогнозованої змінної, оцінка дисперсії коефіцієнтів регресії, коефіцієнт детермінації. Коефіцієнт детермінації R^2 є найбільш ефективною оцінкою адекватності регресійної моделі, мірою якості рівняння регресії. Коефіцієнт детермінації визначається за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{\mathrm{D}(y - \hat{y})}{\mathrm{D}(y)} \ , \tag{2.14}$$

де $\mathrm{D}(y–\hat{y}) = \frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$ – пояснена оцінкою $\hat{y}$ дисперсія ознаки y, $\mathrm{D}(y) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2$ – повна дисперсія ознаки y, n – кількість вимірювань (обсяг вибірки).

Коефіцієнт детермінації характеризує частку дисперсії результативної ознаки y, що пояснюється регресією, в загальній дисперсії результативної ознаки. Чим ближче коефіцієнт детермінації до одиниці, тим менше залишкова або непояснена дисперсія і, отже, тим краще побудоване рівняння регресії відображає залежність між показником y і фактором x [117]. Надалі коефіцієнт детермінації буде використовуватися в якості основного показника достовірності одержуваних залежностей.

Таблиця відповідності LUT (look-up table) в загальному випадку – це структура даних, зазвичай масив або асоціативний масив, що використовується з метою замінити обчислення на операцію простого пошуку.

Існує проміжне рішення, коли використовують LUT в поєднанні з простими обчисленнями – інтерполяцією. Це дозволяє більш точно знаходити значення між двома обчисленими заздалегідь точками. Витрати часу трохи зростуть, але натомість буде забезпечена велика точність обчислень. Також цю техніку можна застосовувати для зменшення розмірів LUT без втрат точності [118].

Але через неоднорідність вхідних даних не вдається достатньо точно скласти таблицю відповідності між значеннями NDVI та LAI.

Складність та варіабельність взаємозв'язку між LAI та NDVI в більшості випадків не дозволяє описати його лінійною та простими нелінійними регресійними залежностями. Так, для тестових ділянок в межах території Києва застосування вищеописаних регресій забезпечує невисокі значення коефіцієнта детермінації: для лінійної регресії R^2 = 0,10 .. 0,22, для квадратичної регресії R^2 = 0,11 .. 0,20, для логарифмічної регресії R^2 = 0,10 .. 0,17, для експонентної регресії R^2 = 0,11 .. 0,25.

Незадовільна точність відновлення статистичних зв'язків між LAI та NDVI за допомогою стандартних регресійних моделей, що підтверджується залученням таблиць відповідності в роботах американських дослідників [119], спонукає використовувати для цього одну з більш складних моделей. Проведена попередня статистична обробка свідчить про достатню ефективність апроксимації нелінійної залежності LAI(NDVI) оптимальною сплайн-інтерполяцією хмари експериментальних точок за умовою достатньої кількості наземних вимірювань.

2.2.1.2. Апроксимація на основі оптимальної сплайн-інтерполяції

Як правило, регресійна модель будується для заданого фіксованого розбиття, що істотно звужує задачу, так як оптимізація вузлів регресійної

моделі призводить не тільки до зменшення помилки, отриманої при використанні даної регресійної моделі, але й може використовуватися для встановлення точки зміни закону розподілу вихідних даних, що дуже важливо для задач діагностики [120]. Для різного виду сплайнів задачі оптимізації вузлів розглядалися, наприклад, у роботах [121, 122].

Регресійна модель має вигляд

$$Y(x) = \varphi(x) + \varepsilon\,, \quad \mathrm{E}(\varepsilon) = 0 \quad , \tag{2.15}$$

де $\varphi(x)$ – певна невідома (передбачається безперервна і безперервно диференційована функція), ε – довільно розподілена випадкова величина, верхня оцінка дисперсії якої σ^2 – відома, x – скалярний дійсний аргумент функції $\varphi(x)$. Експериментальні дані представлені в наступному вигляді: на відрізку $[a,b]$ для значень аргументу x – $x_1 = a,.x_2,\ldots,x_n = b$ задані числа y_i, $i = 1 .. n$.

$$y_i = \varphi(x_i) + \varepsilon_i \quad , \tag{2.16}$$

де ε_i – реалізації випадкової величини ε. Передбачається, що знаходження практично точних значень $\varphi(x)$ $i = 1 .. n$ з достатньою для інженерної практики точністю задає функцію $\varphi(x)$ на відрізку $[a,b]$.

Використовуючи кластерний аналіз, відрізок $[a,b]$ розбивається на кластери C_j, кожен з яких містить n_j точок функції $\varphi(x)$. На відрізку, що відповідає кластеру C_j, функція $\varphi(x)$ апроксимується поліномом ступеня m_j, $m_j < n_j$.

$$\varphi(x) \approx a_{0j} + a_{1j}x + \ldots + a_{m_j j}x^{m_j} \quad , \tag{2.17}$$

Для знаходження оцінок a_{ij}, $i = 1 .. m_j$ використовуються довільні інтерполяційні технології – різноманітні сплайни, криві Бєз’є, ортогональні поліноми Форсайта [123]. Критерієм правильності побудови кластерів C_j,

$j = 1 .. m$ являється існування натуральних чисел $k_j < m_j$, $j = 1 .. m$ для яких оцінки a_{ij}, $l = k_j+1 .. m_j$, $j = 1 .. m$ практично являються оцінками нулів. Якщо ця умова не виконується, необхідно збільшити кількість експериментальних вимірів на відрізку $[a,b]$ [124].

2.2.2. Відновлення регресійних залежностей для території дослідження

Методика відновлення регресійних залежностей полягає у визначенні індексу листкової поверхні наземними методами та співставлення з вегетаційним індексом за даними ДЗЗ.

В межах території досліджень визначаються характерні точки вимірювань, для яких буде складатися залежність між вегетаційними індексами та LAI. За координатами характерних точок на місцевості створюється ділянка досліджень (рис.2.4), яка за розмірами відповідає розміру проекції на земну поверхню піксела знімку, що буде використовуватись.

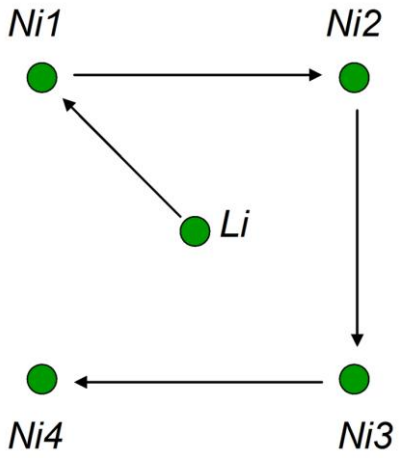


Рис.2.4. Схема вимірювань на дослідній ділянці в межах проекції піксела

Вимірювання на ділянках проводяться двома методами. За першим методом польовим люксметром визначається освітленість Φ під пологом дерев та на відкритій місцевості, що відповідає освітленості над деревами Φ_0.

Проводиться камеральна обробка польових вимірювань. Індекс листкової поверхні кожної точки розраховується за формулою (1.3).

За другим методом проводиться фотографування картини розподілу світла під пологом дерев та одержання напівсферичних фотографій (DHP).

Метод DHP складається з п’ятьох кроків: отримання фотографій, оцифровки, реєстрації, класифікації та розрахунку. Реєстрація, класифікація і розрахунок здійснюються за допомогою спеціального програмного забезпечення GLA (Gap Light Analyzer) з відкритим програним кодом [125].

Висхідні напівсферичні фотографії, як правило, отримують при рівномірному освітленні неба, рано чи пізно в день, або при хмарності. Відоме положення (зеніт і азимут) має важливе значення для належної прив’язки DHP до системи координат. Освітлення необхідне для точної класифікації зображень. Камера, як правило, орієнтована таким чином, що північ (абсолютний або магнітний) розташовується орієнтовно на верхній частині фотографії. Для отримання DHP, як правило, використовується об’єктив “риб’яче око”.

Класифікація DHP включає в себе розподіл пікселів зображення на затінені та не затінені (на яких видно небо). Як правило, це робиться за допомогою інтерактивного порогу, в результаті чого вибирається відповідний поріг для найкращої відповідності двійковий класифікації з спостережуваної видимості неба. Піксельні значення інтенсивності вище порога класифікуються як видимі, а піксельні значення інтенсивності нижче порога класифікуються як невидимі.

Розрахунок індексів за DHP використовує алгоритми, які обчислюють необхідну геометрію купола та індекси сонячної радіації. Для швидкого розрахунку сонячної радіації часто використовуються заздалегідь розраховані таблиці перетворення теоретичних або емпіричних значень сонячного випромінювання досліджуваних секторів неба або їх положення щодо сонячних променів [126-128].

Отже, були розглянуті основні види регресійних залежностей LAI(NDVI) та комплекс польових робіт для їх відновлення. Найбільшу достовірність регресійної залежності забезпечує алгоритм апроксимації методом оптимальної сплайн-інтерполяції. Критерієм оптимальності при цьому є значення

коефіцієнта детермінації, підвищення якого досягається через застосування кластерного перерозподілу.

2.3 Метод оцінювання якості рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків

Якісні характеристики рослинності за багатоспектральними аерокосмічними знімками зазвичай оцінюються опосередковано – за спектральними ознаками зображення на конкретній ділянці із завіркою за прямими наземними вимірюваннями [6]. При цьому слід враховувати, що характер цих опосередкованих залежностей, як правило, нелінійний, та різний для різних типів рослинних угруповань [129], тому для їх опису застосовуються нелінійні регресійні залежності, нечіткі функції або таблиці відповідності [130].

2.3.1. Обґрунтування визначення показника якості рослинності за багатоспектральними космічними знімками

Концентрація хлорофілу та інших життєутворюючих ферментів у фотосинтетично активних зелених частинах рослин є непрямим показником актуального стану рослинності [131]. Її може бути оцінено шляхом вимірювання кількісних характеристик форми спектральних кривих [5].

В даній роботі для цього обрано величину екстремуму першої похідної функції спектрального відбиття в зоні червоного краю рослинності 0,68-0,73 мкм. За дистанційними вимірюваннями цієї величини шляхом сплайн-інтерполяції зонального відбиття багатоспектрального зображення відновлено та відтарировано функцію її взаємної регресії з нормованою якістю рослинності на еталонних ділянках.

В ході досліджень було виявлено, що за дистанційними даними кращу кореляцію з наземними показниками якості рослинності урбанізованих територій забезпечує не положення червоного краю рослинності в спектрі REP, яке найчастіше застосовується для такого роду задач, а екстремум першої похідної в зоні червоного краю RET (рис.2.5).

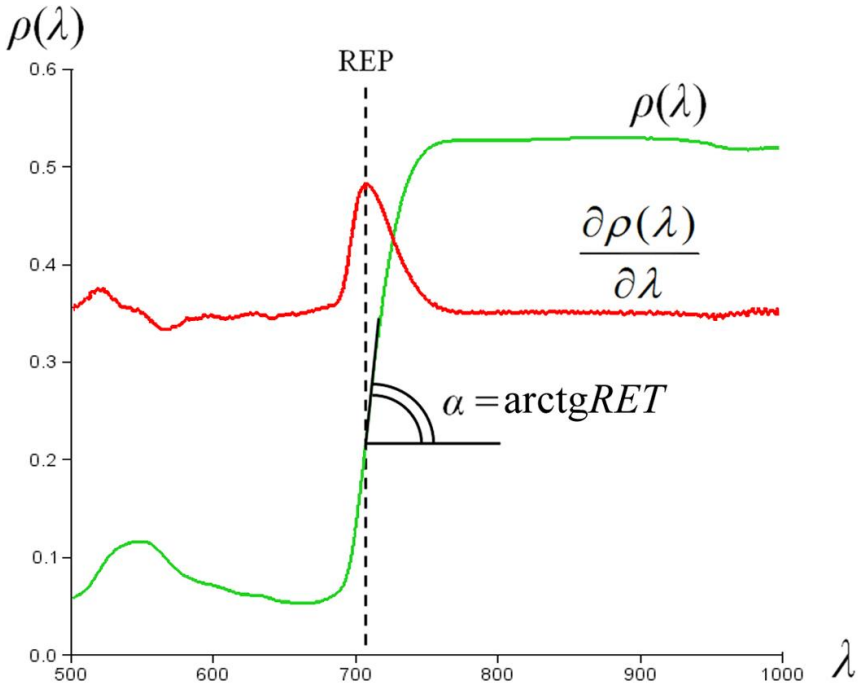


Рис.2.5. Екстремум першої похідної в зоні червоного краю

RET почасти нагадує широко відомий вегетаційний індекс NDVI, але на відміну від NDVI він більш точно описує криву спектрального відбиття рослинності в зоні червоного краю.

Для відновлення як REP, так і RET за матеріалами багатоспектральної космічної зйомки потрібне як можна точне відновлення спектральної кривої рослинності в зоні червоного краю на основі інтегральних значень відбиття в робочих спектральних діапазонах, що фіксує багатоспектральний сенсор. Таке відновлення можна зробити шляхом якісної інтерполяції з опорою на точки спектральних відліків сенсора.

2.3.2. Вибір методу апроксимації спектральних кривих

В роботі досліджувались 3 типа апроксимацій спектральних кривих шляхом інтерполяції багатоспектральних вимірювань: частково-лінійна (ламана), поліноміальна та сплайн-інтерполяція. За вихідні дані було взято набори експериментальних кривих спектрального відбиття листя трьох рослин (береза, верба та ясень) в різних станах – молоде, сформоване та пожовкле. Спектральні криві (рис. 2.6.) з дискретизацією 1 нм було одержано за

допомогою прецизійного польового спектрометра ASD FieldSpec 3FR контактним способом.

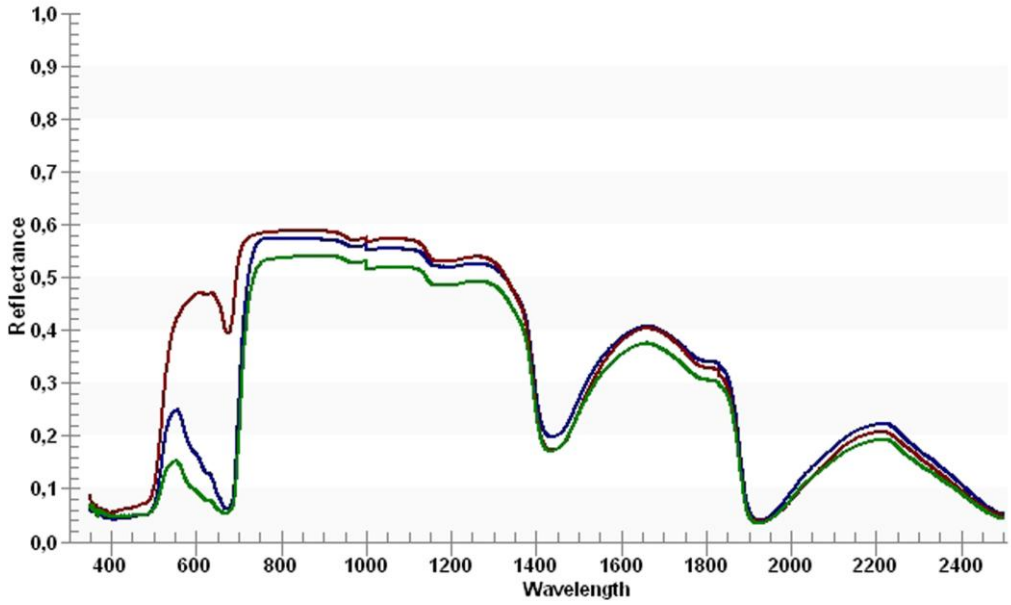


Рис. 2.6. Спектральні криві відбиття листя ясеня

Проводилось моделювання для чотирьох типових багатоспектральних сенсорів середньої – Landsat/ETM+, RapidEye/JSS, “Січ-2”/МСУ – та високої – Pléiades-1A/VHR – просторової розрізненності, розташування робочих спектральних діапазонів яких ілюструється рис. 2.7.

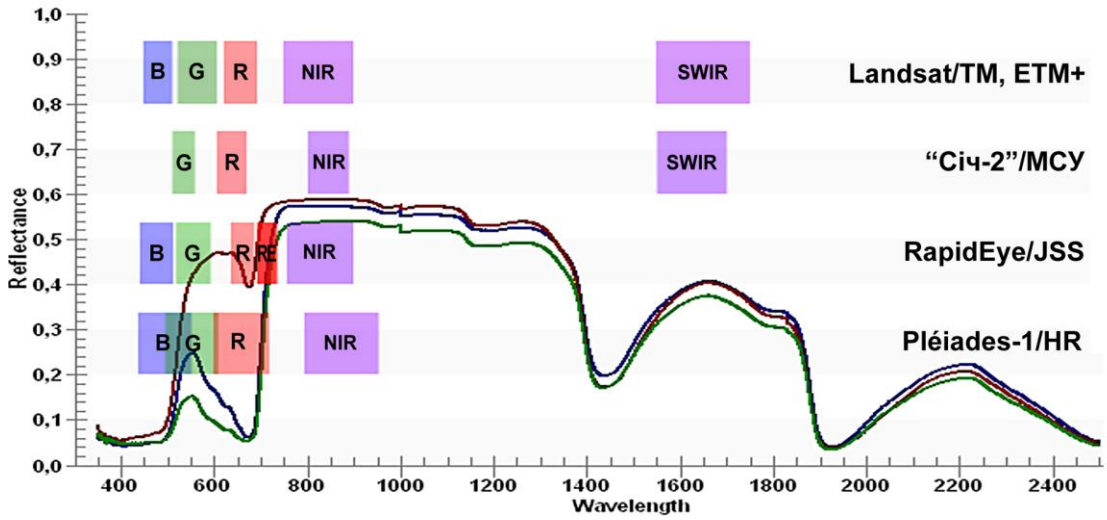


Рис.2.7. Розташування робочих спектральних діапазонів досліджуваних багатоспектральних сенсорів, межі яких представлені в табл.2.3.

Таблиця 2.3

Межі спектральних діапазонів розглянутих сенсорів

Супутник/сенсор	Спектральний діапазон, мкм	Назва каналу
Landsat-7/ETM+	0,45–0,52 0,53–0,61 0,63–0,69 0,78–0,90 1,55–1,75	Синій (B) Зелений (G) Червоний (R) Ближній ІЧ (NIR) Середній ІЧ (SWIR)
“Січ-2”/МСУ	0,51–0,559 0,61–0,668 0,80–0,889 1,55–1,70	Зелений (G) Червоний (R) Ближній ІЧ (NIR) Середній ІЧ (SWIR)
RapidEye/JSS	0,44–0,51 0,52–0,59 0,63–0,685 0,69–0,73 0,76–0,88	Синій (B) Зелений (G) Червоний (R) Червоний край (RE) Ближній ІЧ (NIR)
Pléiades-1A/VHR	0,43–0,55 0,49–0,61 0,60–0,72 0,79–0,95	Синій (B) Зелений (G) Червоний (R) Ближній ІЧ (NIR)

При дослідженні точності апроксимації, що забезпечується різними методами, за основний критерій було обрано похибку визначення кута arctg *RET* в порівнянні з еталонними спектральними кривими. Сумарні абсолютне чи квадратичне відхилення апроксимуючої кривої від експериментальної не враховувалися.

2.3.2.1. Метод частково-лінійної інтерполяції

Метод полягає у визначенні відрізків лінійних функцій, які з’єднують точки інтерполяції. На кожному *i*-му інтервалі інтерполяції спектральне відбиття ρ_i апроксимується окремою лінійною функцією:

$$\rho_i = a_i \cdot \lambda + b_i \ , \tag{2.18}$$

де a_i, b_i – коефіцієнти, λ – довжина хвилі.

За середніми значеннями спектральної кривої, в межах визначених в таблиці 2.3 каналів, були отримані апроксимації спектральних кривих для кожного сенсору по 9-ти досліджуваним зразкам рослинності методом частково-лінійної інтерполяції. Результати представлені графічно на рис.2.8.

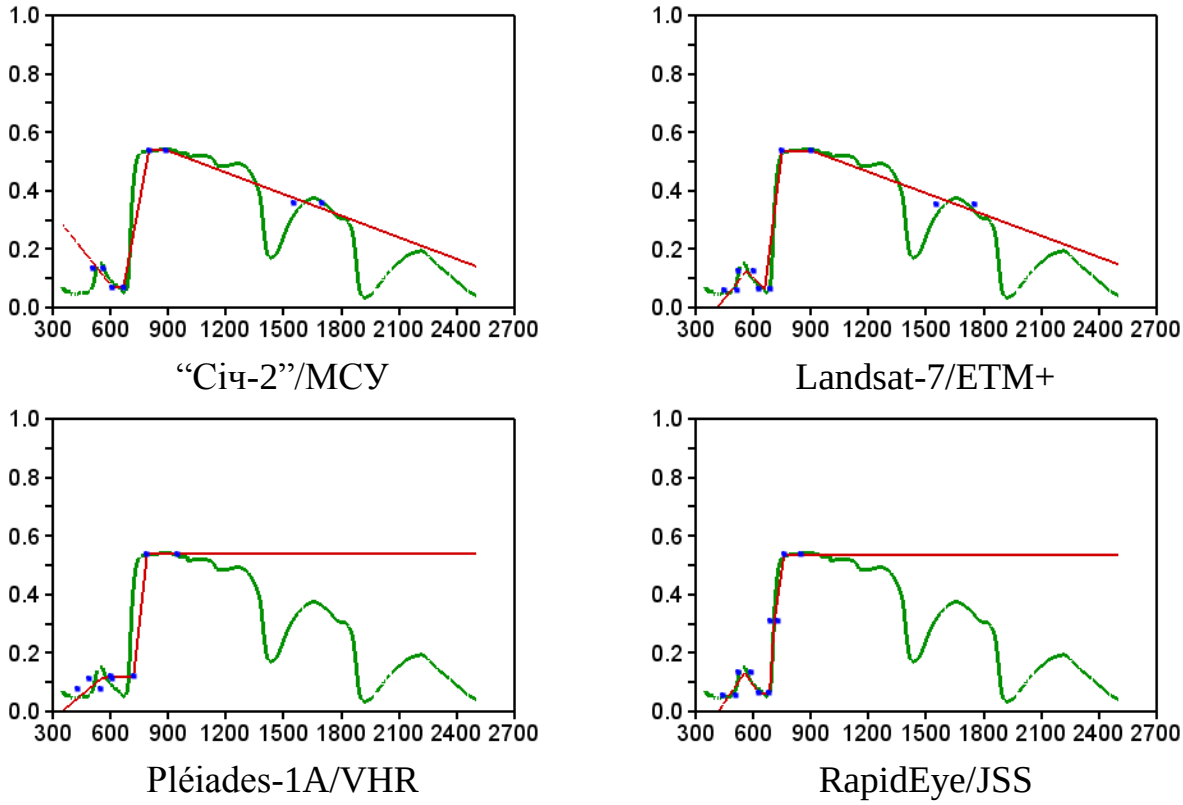


Рис.2.8. Спектральні криві відбиття рослинності, апроксимовані методом частково-лінійної інтерполяції

Відхилення кута RET для кривих, апроксимованих методом частково-лінійної інтерполяції від еталонних спектральних кривих рослинності складає від -10,1 до -12,3 відсотків.

2.3.2.2. Метод поліноміальної інтерполяції

Поліноміальна інтерполяція виконувалося поліномом Лагранжа, який має вигляд:

$$\rho(\lambda) = \sum_{i=0}^{n} p_i(\lambda)\,\rho_i \quad , \tag{2.19}$$

де $p_i(\lambda)$ – поліноми на одиницю меншого порядку, ніж кількість точок інтерполяції, які обчислюють за формулою:

$$p_i(\lambda) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^{n} \frac{(\lambda - \lambda_k)}{(\lambda_i - \lambda_k)} \quad . \tag{2.20}$$

Результати апроксимації методом поліноміальної інтерполяції представлені графічно на рис.2.9.

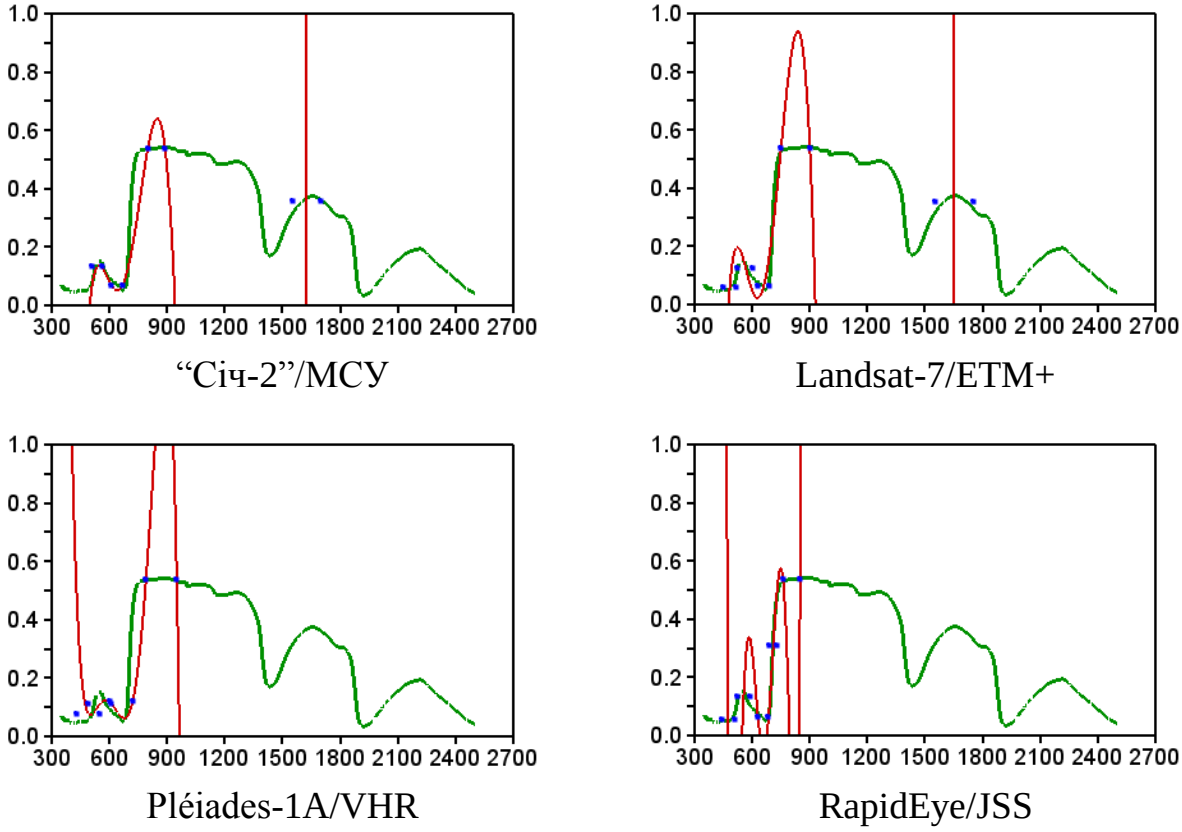


Рис.2.9. Спектральні криві відбиття рослинності, апроксимовані методом поліноміальної інтерполяції

Відхилення кута RET для кривих, апроксимованих методом поліноміальної інтерполяції від еталонних спектральних кривих рослинності складає від -7,1 до -10,6 відсотків.

2.3.2.3. Метод сплайн-інтерполяції

Цей метод базується на визначенні оптимальних вузлових точок з подальшим їх поєднанням кривою, яка забезпечує в кожній точці неперервність функції що інтерполюється та її першої і другої похідних [132].

Функції, що задають фрагменти сплайна, залежать від множини параметрів, завдяки яким вони змінюють свою форму. Значення параметрів на кожному із фрагментів індивідуальні. Ці параметри можуть задавати конкретний сплайн. Для поліноміальних сплайнів це поліноміальні коефіцієнти. Отже, сплайн можна представити множиною параметрів функцій на кожному з фрагментів. Пофрагментне представлення є наочним, часто має явний фізичний зміст. Але число параметрів є надмірним. Так, для кубічного сплайна необхідно мати $4\cdot(n-1)$ параметри (n – число вузлів сплайна). Значно компактнішим є представлення сплайна у вигляді полінома, через базисні сплайн-функції у вигляді:

$$S(\lambda)=\sum_{j-1}^{T} a_j B_j(\lambda) \quad , \tag{2.21}$$

де $B_j(\lambda)$ – базисні сплайн-функції (як правило локальні), a_j – числові коефіцієнти, що задають вагу базисних функцій при формуванні сплайна.

Число параметрів, що задають сплайн, рівне числу вузлів сплайна. Між параметрами функції на фрагменті та коефіцієнтами полінома-сплайна існує залежність, що дозволяє за одними коефіцієнтами знаходити інші, хоча обчислювальні процедури при цьому можуть мати досить складний вигляд.

Особливістю апроксимації спектральних кривих відбиття за багатоспектральними вимірюваннями (рис.2.10.) є наявність вузлів інтерполяції за межами діапазону інтерполяції – вимірювання в синьому (blue) та середньому інфрачервоному (SWIR) спектральних діапазонах, що дозволяє використовувати сплайн із закріпленими кінцями (clamped spline) [133], оцінивши значення похідних між спектральними діапазонами blue – green та NIR – SWIR. Можна сподіватися, що такий тип інтерполяції більш природно узгоджується із реальним характером зміни спектрального відбиття за спектром, і, відповідно, забезпечить вищу точність апроксимації.

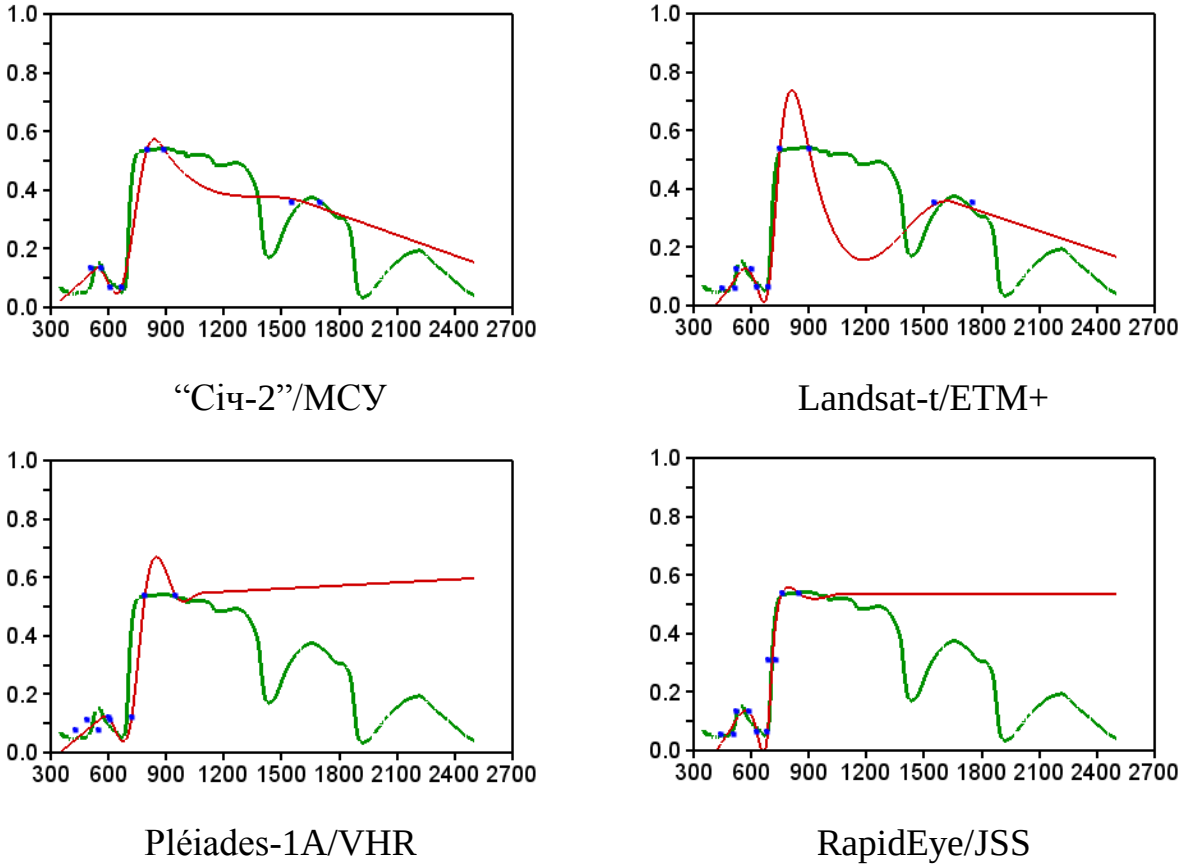


Рис.2.10. Спектральні криві відбиття рослинності, апроксимовані методом сплайн-інтерполяції

Відхилення кута RET для кривих, апроксимованих методом сплайн-інтерполяції від еталонних спектральних кривих рослинності складає від 2,8 до -6,7 відсотків.

Узагальнена точність визначення кута RET для різних методів інтерполяції описується табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Підсумкове відхилення апроксимованих кривих

Метод інтерполяції	Загальний стан листя		
	Молоде	Сформоване	Пожовкле
Лінійний	-12,3 %	-10,9 %	-10,1 %
Поліноміальний	-10,0 %	-7,1 %	-10,6 %
Сплайн	-6,7 %	-4,5 %	2,8 %

Як найбільш придатний для подальшого дослідження було обрано метод оптимальної сплайн-інтерполяції з урахуванням похідних на границях зони червоного краю, який на відміну від інших методів є більш точним та стійким до шумів [134].

2.3.3. Відновлення регресійних залежностей показників якості рослинності за дистанційними та наземними даними

Результати багатьох досліджень вказують на важливу роль деревної рослинності в процесах виведення газоподібних домішок з атмосферного повітря [135-138]. При цьому багато хто вважає, що основним способом зниження рівня забруднення повітря може бути тільки технологічний (фільтри, улавлювачі), а біологічний спосіб можна розглядати тільки як додатковий, допоміжний.

Перші експериментальні дослідження газопоглинальної здатності рослин [139-141] показали, що між накопиченням шкідливих інгредієнтів листям та стійкістю рослинності існує серйозне протиріччя. Воно викликане тим, що висока скорість поглинання шкідливих газів приводить до пошкодження асиміляційних органів і навіть загибелі рослин, до скорочення або припинення санітарної функції.

Дослідження газопоглинальної здатності рослинності потребує використання приладів, зокрема польового газоаналізатора. За відсутності приладу, в даному дослідженні як альтернативний варіант будемо використовувати рекреаційні характеристики. Більше за інші показники для визначення якісного стану рослинності підходить коефіцієнт рекреації., так як опис його значень (табл.1.1) відповідає параметрам, які отримуються за даними космічних знімків.

Через великий розкид даних, суб'єктивність експертних оцінок та варіативність всередині виділів застосовуємо статистичну регресію.

Метод найменших квадратів (МНК) досить чутливий до великих одиночних викидів, пов'язаних з грубими помилками в даних. В основі МНК лежить припущення про незалежність і нормальність розподілу помилок. Методи відновлення регресії, стійкі до шуму у вихідних даних, називають робастними (robust).

Простий евристичний спосіб побудови робастного МНК полягає в просіюванні (цензуруванні) вибірки. Завдання вирішується кілька разів. Після кожного разу з навчальної вибірки виключається деяка частка об’єктів, що мають занадто великі нев’язки $\varepsilon_i = f(x_i, \alpha) - y_i$. Ітерації тривають до тих пір, поки вдається виділяти об'єкти з великими невязками. На практиці, як правило, буває достатньо двох ітерацій. Максимальна частка відсіяних об'єктів задається виходячи зі змісту завдання. Наприклад, якщо викиди дійсно обумовлені грубими помилками вимірювань, то на гістограмі розподілу невязок відповідні точки легко відділяються за допомогою статистичних або евристичних критеріїв.

Ще один спосіб полягає в тому, щоб замість квадратичної функції втрат ввести обмежену зверху функцію, яка в околиці нуля поводиться як квадратична, а на нескінченності прагне до горизонтальної асимптоти. Така функція втрат не розрізняє великі і надвеликі відхилення. Класичний приклад – функція Мєшалкіна:

$$L(a, y) = 1 - \exp\left(-\frac{(a-y)^2}{2\sigma} \right) , \qquad (2.22)$$

де σ – параметр, що дорівнює дисперсії “звичайного” шуму, не пов’язаного з великими викидами.

Завдання мінімізації функціоналу з такою функцією втрат вже не може бути вирішена засобами лінійної алгебри; доводиться застосовувати чисельні методи оптимізації, наприклад, метод спряжених градієнтів [142].

2.4 Метод виявлення просторово-часових трендів змін рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків

Як було показано в розділі 1, основними характеристиками часового ряду змін рослинності являються: тренд, циклічні та сезонні коливання, випадкові флуктуації, викиди, тощо. Спостерігається значний вплив тривалості вегетаційного періоду та особливостей росту рослинності урбанізованих територій.

2.4.1. Вплив тривалості вегетаційного періоду рослинних угруповань території досліджень

Період року, коли можливе зростання і розвиток (вегетація) рослин називається вегетаційним періодом. Тривалість залежить від географічної широти, клімату. Проте, для кожної рослини існують свої мінімальні температури. Якщо холодостійкі рослини спокійно переносять низьку температуру, то теплолюбиві при такій температурі можуть загинути. Тому часто за вегетаційний період приймають кліматичне літо. У тропіках вегетаційний період продовжується весь рік, у високих широтах і горах – від останнього весняного до першого осіннього заморозку. Вегетаційний період для більшості рослин визначається як період з середніми температурами 5° і вище. На більшій частині території України вегетаційний період починається в кінці березня, а закінчується наприкінці жовтня [143].

Під фенологічним розвитком рослин розуміють закономірне чергування та щорічне повторення одних і тих же фенологічних циклів (вегетації і спокою, росту пагонів та його припинення, цвітіння, дозрівання плодів і насіння та ін.), а в межах циклів - послідовний хід настання і проходження фенологічних фаз росту і розвитку. Календарний час настання тієї чи іншої фенофази називають фенодатою, а часовий інтервал між певними фенодатами становить міжфазний період, або фенологічний цикл [144].

Динаміка настання фенофаз, терміни початку, закінчення і тривалість фенологічних циклів у рослин знаходяться під постійним і могутнім впливом сезонних змін географічного середовища (природи) і передусім сезонності кліматичних умов (закономірного чергування на Землі сезонів з різною тривалістю дня і ночі, теплих і холодних , дощових та сухих), пристосовуючись до яких рослини істотно змінюють ритміку процесів росту і розвитку, фенологічний стан. У теплі або дощові сезони рослини вегетують, в холодні або сухі впадають в спокій. Під впливом сезонних змін погодних умов у рослин різко змінюється динаміка їх ростових процесів. Тому фенологічний розвиток рослин розуміють як їх сезонний розвиток.

Фенологічні спостереження мають велике значення в практиці озеленення міських територій. Вивчення динаміки сезонного розвитку рослин необхідне при підборі їх для озеленення, для оцінки естетичних та санітарно-гігієнічних властивостей рослин, при розробці та проведенні заходів, що забезпечують підвищення біологічної стійкості міських зелених насаджень, їх захист від шкідників і хвороб. Матеріали фенологічних спостережень використовують при складанні календарів цвітіння рослин, дозрівання та збору плодів і насіння, при встановленні оптимальних строків посіву і посадки.

Регулярні багаторічні фенологічні спостереження дуже важливі для встановлення фактичних місцевих періодів настання фенофаз у досліджуваних рослин. Ці ж фенологічні спостереження дозволяють виявляти справжню тривалість різного роду фенологічних циклів, насамперед циклів вегетації і спокою.

Вегетація – це такий стан рослин, при якому відбуваються процеси видимого росту вегетативних та генеративних органів, і здійснюється безперервна асиміляційна діяльність листя.

Спокій – період (у тимчасовому відношенні – цикл) у річному циклі розвитку рослин, коли видимий ріст відсутній, а листя не асимілюють, в тому числі і у вічнозелених рослин (а якщо асимілюють, то тільки в окремі дні і години з досить високою для здійснення фотосинтезу температурою повітря).

У листопадних видів деревних рослин фенологічним індикатором початку вегетації є розпускання вегетативних бруньок, а закінчення її - повне осіннє розцвічування листя в кроні або їх опадання, якщо листя опадає зеленим. У вічнозелених видів фенологічні ознаки початку і закінчення вегетації менш визначені і різними вченими розуміються неоднаково.

Тривалість кожної фази визначається в днях. Щорічно вона дещо змінюється, в залежності від погодних умов літа та від впливу інших факторів навколишнього середовища.

Для виявлення просторово-часових трендів змін стану рослинності відбираються знімки, які задовольняють наступним умовам досліджень: фенологічні фази з максимальною продуктивністю, відсоток покриття хмарами всього знімку чи частини, що досліджується, не більше 5%.

Космічні знімки визначаються просторовою (табл. 2.5) та часовою (табл. 2.6) розрізненністю. Просторова розрізненність космічних знімків обумовлена загальною площею території дослідження, та рівнем деталізації завдань, що виконуються.

Таблиця 2.5

Просторова розрізненність,
яка потрібна для аналізу стану рослинності

Рівень	Глобальний	Регіональний	Локальний
Просторова розрізненність	Низька (250-1000 м)	Середня (5-50 м)	Висока (до 5 м)

Часова розрізненність космічних знімків (табл. 2.6) визначається стадією фенологічного циклу, тобто швидкістю росту рослинності.

Для більш-менш достовірної оцінки динаміки росту рослинності потрібно 3-5 космічних знімків для кожної фенофази (рис.2.11).

Таблиця 2.6

Часова розрізненність, яка потрібна для аналізу стану рослинності

Фенофаза	Період повторної зйомки, діб
1. Кінець періоду спокою та початок сокоруху	– *
2. Цвітіння, розпускання листків	1-2
3.Активний ріст біомаси	4-5
4. Період максимальної продуктивності	12-13
5. Спад вегетації	15
6. Початок періоду спокою	– *

* зйомка може проводитися для додаткової ідентифікації вічнозелених рослин, або інших об’єктів

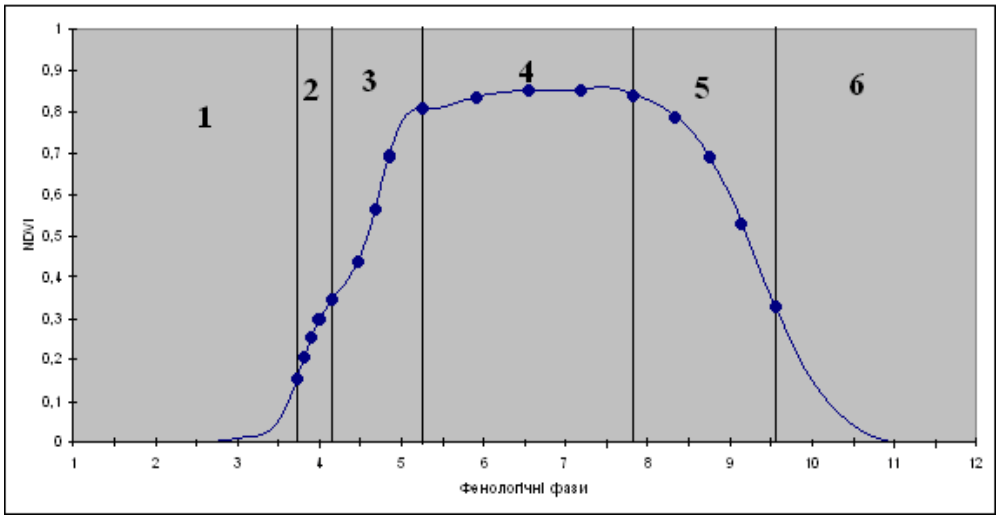


Рис. 2.11. Графік орієнтовної частоти зйомок на протязі року

У зв’язку зі змінами кліматичних та інших умов зовнішнього середовища в одних і тих же видів і форм рослин однойменні фенофази можуть наступати в абсолютно різні терміни як в одному географічному пункті, так і в різних, тому ці узагальнені характеристики уточнюються для кожного конкретного випадку.

2.4.2. Обґрунтування вибору основних показників для дослідження просторово-часових змін стану рослинності

В роботі розглядається лінійний тренд (рис. 2.12), який описується середнім значенням за весь період аналізу (mean) та середнім приростом за певний період (annual).

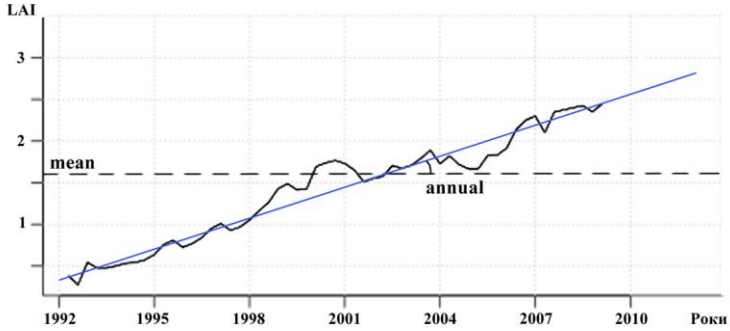


Рис. 2.12. Лінійний тренд змін рослинності

Оскільки основним об’єктом досліджень являється рослинність, для якої характерні переважно сезонні коливання, то для оцінки періодичних компонент варто розраховувати середньорічний приріст.

Періодичні складові описуються характерною частотою гармонік періодичних коливань. Оскільки розглядається складний процес розвитку рослинності на протязі від кількох до десятків років, лінія тренду розкладається в ряд Фур’є. Методом MESE (maximum entropy spectral estimation) [145] (рис. 2.13) визначається резонансна гармоніка, яка має самий потужний вклад в часовий ряд (resonance). Важливим показником є відповідний найбільшій частоті період (periodic).

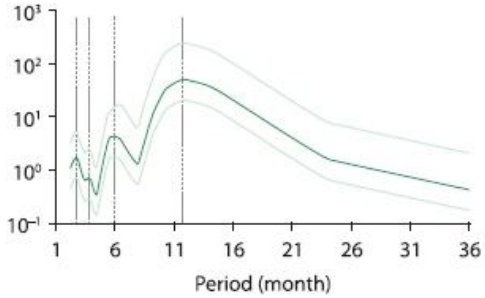


Рис. 2.13. Оцінювання періодичних складових змін рослинності за роцедурою MESE (maximum entropy spectral estimation)

Так як основні площі рослинності урбанізованої території (міської агломерації) незмінні, очікувана періодичність має приймати значення близько 11-12 місяців. Зменшення періодичності можливе через появу нових насаджень, або знищення існуючих, а також наявність земель аграрного призначення (вплив сівозмін та озимих видів).

Висновки до другого розділу

1. Розглянуті методи попередньої обробки космічних знімків, потрібні для розв’язання задач оцінювання стану рослинності урбанізованих територій. Особливу увагу приділено радіометричному калібруванню сенсорів супутникової системи “Січ-2” з використанням даних польових спектрометрометрічних вимірювань.

2. Обґрунтовано основні показники, що визначають стан рослинності урбанізованих територій і будуть використовуватися при його оцінюванні за багатоспектральними космічними знімками: для кількості рослинності – індекс листкової поверхні LAI, для якості рослинності – величина екстремуму похідної спектрального відбиття в зоні червоного краю 0,68-0,73 мкм.

3. Розроблено теоретичне підґрунтя методів оцінювання стану рослинності за багатоспектральними космічними знімками – методу оцінки кількості на основі побудови робастної регресії, методу оцінки якості шляхом оптимальної сплайн-інтерполяції та методу оцінювання трендів просторово-часових змін рослинності.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКІСНО-ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОСЛИННОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

Результатом створення загальної методики дослідження стану рослинності має стати певний геоінформаційний продукт, який базується на використанні багатоспектральних космічних знімків та наземних завіркових даних. Також загальна методика повинна включати в себе дослідження кількісних та якісних характеристик рослинності та їх змін з плином часу.

Згідно розроблених методів оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків необхідні алгоритми та демонстраційне програмне забезпечення утворюють основні функціональні модулі.

3.1 Розробка алгоритмів оцінки кількості рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків

Згідно з загальною схемою проведення дослідження (рис.1.2), алгоритм оцінки кількості рослинності спирається на визначення індексу листкової поверхні, основного показника активності процесів фотосинтезу.

Використовується метод відновлення регресійних залежностей (пункт 2.2.2) між нормалізованим вегетаційним індексом, отриманим дистанційно, та індексом листкової поверхні, отриманим за даними наземних спостережень.

Алгоритм 3.1. Алгоритм оцінки кількості рослинності урбанізованих територій заснований на методах, описаних в підрозділі 2.2, та складається з наступних кроків:

Крок 1. Вибір багатоспектральних космічних знімків з урахуванням завдань досліджень та критеріями, описаними в підрозділі 2.1.

Крок 2. Попередня обробка знімків (пункти 2.1.1, 2.1.2.): радіометрична та атмосферна корекція, отримання та накладання масок хмарності.

Крок 3. Розрахунок просторового розподілу NDVI для відмежування рослинності від інших природних та штучних об’єктів.

Крок 4. Побудова маски рослинності досліджуваної території за допомогою порогового вирішального правила. Порогове значення NDVI вибирається візуально-камеральним шляхом і може відрізнятись для кожного знімку в залежності від фенологічного етапу розвитку рослинності.

Крок 5. Застосування маски рослинності до відкаліброваних багатоспектральних знімків.

Крок 6. Класифікація отриманого зображення в межах території дослідження методом максимальної правдоподібності за формулою (2.8), або іншим придатним для цього методом.

Крок 7. Виділення за результатами класифікації основних класів рослинних угруповань, таких як: листяні та хвойні ліси, чагарники, сільськогосподарські угіддя, луки та пасовища, ділянки з розрідженою рослинністю, тощо.

Крок 8. Проведення наземних вимірювань на тестових ділянках території досліджень за методами, описаними в пункті 2.2.2, з метою отримання регресійних залежностей LAI(NDVI) для основних класів рослинних угруповань.

Крок 9. Відновлення розподілу індексу листкової поверхні супутникових знімків в межах маски рослинності за отриманою залежністю LAI(NDVI)

Крок 10. Розрахунок повної площі S зелених насаджень території дослідження в межах маски рослинності за формулою (3.1).

$$S = \sum_{a \in A} S(a) \cdot L(a) \quad , \tag{3.1}$$

де $S(a)$ – площа рослинності в елементарній ділянці a території A (м^2), $L(a)$ – значення LAI в елементарній ділянці території.

Розглянутий алгоритм 3.1 реалізований у вигляді розрахункового скрипта в обчислювальному середовищі SciLab, програмний код скрипта наведений в додатку Б.2.

Для отримання повних і статистично значимих завіркових даних, потрібних при відновленні регресійних залежностей LAI(NDVI), польові наземні вимірювання мають задовольняти певні вимоги, що призводить до необхідності розробки формалізованого алгоритму, результатами застосування якого мають бути масиви значень LAI в спеціально визначених точках вимірювань.

Алгоритм 3.2. Алгоритм проведення польових наземних вимірювань з метою відновлення залежності між індексом листкової поверхні та NDVI складається з наступних кроків:

Крок 1. Аналіз результатів класифікації (алгоритм 3.1, крок 6) та порівняння їх з просторовим розподілом NDVI (алгоритм 3.1, крок 3) в межах маски рослинності (алгоритм 3.1, крок 4).

Крок 2. Вибір характерних пікселів для кожного класу, значення NDVI яких рівномірно охоплюють діапазон від 0 до 1.

Крок 3. Прокладання маршруту проведення польових вимірювань на ділянках, координати яких розташовані в межах характерних пікселів.

Крок 4. Проведення вимірювань на тестових ділянках за схемою, описаною в пункті 2.2.2 двома методами.

Крок 4.1. За *першим методом* польовим люксметром визначається освітленість Φ під пологом дерев та на відкритій місцевості, що відповідає освітленості над деревами Φ_0.

Крок 4.2. За *другим методом* проводиться фотографування картини розподілу світла під пологом дерев та одержання напівсферичних фотографій.

Крок 5. Проведення камеральних робіт.

Крок 5.1. Розрахунок індексу листкової поверхні кожної точки за формулою (1.3).

Крок 5.2. Обробка напівсферичних фотографій в програмному продукті GLA, з метою обчислити індекс листкової поверхні.

Результатом обробки даних є конкретне значення листкового індексу в досліджуваній точці для кожного методу.

Крок 6. Оцінка достовірності та визначення остаточних усереднених значень індексу листкової поверхні.

Крок 7. За отриманими даними складається регресійна залежність LAI(NDVI). Основні види регресій, що перевіряються, описані у підпункті 2.2.1.1. В результаті попередніх досліджень (пункт 2.2.1) визначено, що найбільшу достовірність регресійної залежності забезпечує алгоритм апроксимації методом оптимальної сплайн-інтерполяції. Критерієм оптимальності при цьому є значення коефіцієнта детермінації, підвищення якого досягається через застосування кластеризації хмари точок вимірювань для визначення оптимальних точок інтерполяції. Кластеризація виконується за наступним алгоритмом:

Алгоритм 3.3. Алгоритм кластерного аналізу результатів вимірювань:

Крок 1. Отримання двовимірної хмари точок вимірювань LAI(NDVI);

Крок 2. Розподіл хмари точок на кластери;

Крок 3. Визначення геометричних центрів мас для всіх кластерів, які призначаються вузлами інтерполяції;

Крок 4. Проведення інтерполяційного сплайна через вузли інтерполяції;

Крок 5. Розрахунок коефіцієнта детермінації R^2 інтерполяційного сплайна відносно хмари вимірювань.

Крок 6. Визначення дискретного псевдоградієнта зміни R^2 для поточного розбиття в просторі складу кластерів.

Крок 7. Перерозподіл точок по кластерах в напрямку дискретного псевдоградієнта.

Крок 8. Переобчислення коефіцієнта детермінації для нового перерозподілу за кроком 3.

Крок 9. Порівняння переобчисленого R^2 з одержаним на попередній ітерації.

Якщо коефіцієнт детермінації зріс – перехід до кроку 2 зі знов одержаним перерозподілом; якщо ні – кінець алгоритму, вивід оптимальних вузлів інтерполяції.

Кластерний аналіз хмари точок вимірювань проводиться методом *K*-Means у відкритому програмному середовищі Cluster 3.0 [146].

Описані алгоритми 3.1, 3.2 і 3.3 разом складають єдину проміжну методику оцінки кількості рослинності урбанізованої території з використанням багатоспектральних космічних знімків, схему операцій якої подано на рис. 3.1.

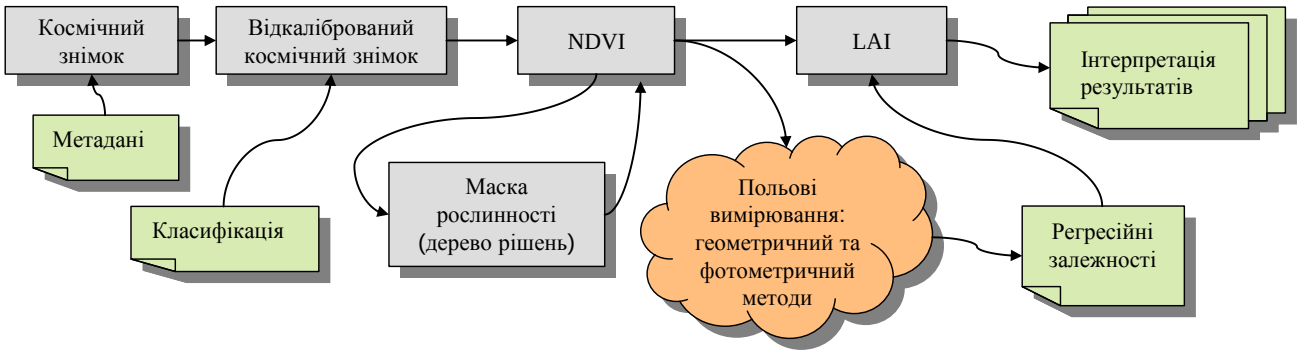


Рис. 3.1. Схема операцій проміжної методики оцінки кількості рослинності

Перша група операцій служить для попередньої обробки багатоспектрального космічного знімка. Друга група містить операції з побудови LAI на основі маски рослинності, регресійної залежності LAI(NDVI). Остаточна група операцій забезпечує візуалізацію та інтерпретацію результатів.

3.2 Розробка алгоритмів оцінки якості рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків

Згідно з загальною схемою проведення дослідження (рис.1.2), алгоритм оцінки якості рослинності спирається на визначення величини екстремуму першої похідної функції спектрального відбиття в зоні червоного краю рослинності.

Використовується метод сплайн-інтерполяції зонального відбиття багатоспектрального зображення для відновлення регресійних залежностей

(пункт 2.3.3) між нормалізованим показником якості рослинності за дистанційними даними та рекреаційним показником, отриманим за даними таксації.

Алгоритм 3.4. Алгоритм оцінки якості рослинності урбанізованих територій заснований на методах, описаних в розділі 2.3, та складається з наступних кроків:

Кроки 1-4 повторюють кроки алгоритму 3.1.

Крок 5. Аналіз карти розподілу виділів (елементарних ділянок рослинних угруповань).

Крок 6. Виокремлення виділів, на які наявні дані наземної завірки.

Крок 7. Створення маски території досліджень по межах виділів.

Крок 8. Перетворення багатоспектральних даних сенсора на інтерполяційну криву, яка наближена до спектральної кривої досліджуваних ділянок рослинності за методом оптимальної сплайн-інтерполяції з урахуванням похідних на границях зони червоного краю.

Крок 9. Визначення піксельних значень екстремуму похідної в зоні червоного краю RET в межах маски рослинності, створеної на кроці 4.

Крок 10. Визначення середнього значення RET для кожного виділу.

Крок 11. Аналіз експертних показників ландшафтної оцінки, їх нормування та отримання завіркових значень безрозмірного відсоткового показника VQF (vegetation quality factor) для кожного виділу.

Крок 12. Нормалізація статистичних вибірок та побудова робастної регресійної залежності (нечутливої до різних відхилень і неоднородностей у вибірці) VQF(RET) за методами, описаними в пункті 2.3.3.

Крок 13. Визначення показника VQF за формулою робастної регресії, одержаної на кроці 12, для всіх пікселів багатоспектрального космічного знімка в межах території досліджень.

Згаданий в кроці 8 алгоритму 3.4 метод оптимальної сплайн-інтерполяції з урахуванням похідних на границях зони червоного краю потребує окремого алгоритму реалізації.

Алгоритм 3.5. Алгоритм REI (red-edge interpolation) спектрального відбиття рослинності в зоні червоного краю.

Крок 1. Визначення характеристик спектральних діапазонів сенсора.

Крок 2. Отримання по зображенню у відповідному спектральному каналі сенсора середнього значення сигналу в основних робочих діапазонах: G (green), R (red), NIR (near infrared).

Крок 3. Оцінка значень на кінцях інтерполяційного сплайну за надлишковими спектральними діапазонами: B (blue) та SWIR (short-wave infrared).

Крок 4. Відновлення інтерполяційного сплайна із закріпленими кінцями (clamped spline).

Крок 5. Знаходження максимуму похідної інтерполяційного сплайна в зоні R-NIR.

Крок 6. Розрахунок показника RET за формулою (3.2):

$$\mathrm{RET} = \max_{\lambda} \frac{\partial}{\partial \lambda} \hat{\rho}(\lambda) \quad , \tag{3.2}$$

де $\hat{\rho}(\lambda)$ – апроксимоване інтерполяційним сплайном спектральне відбиття рослинності.

Розглянутий алгоритм 3.5 реалізовано розрахунковим скриптом в обчислювальному середовищі SciLab та наведений в додатку Б.3.

Через неоднорідність вхідних даних, наявність експертних оцінок та значних викидів, зумовлених помилками оператора, необхідна побудова робастної регресійної залежності VQF(RET) за алгоритмом LOWESS для робастного згладжування:

Алгоритм 3.6. Алгоритм LOWESS [147,148] для робастного згладжування заснований на методах, описаних в пункті 2.3.3. Вхідними даними алгоритму є навчальна вибірка <RET, VQF> розмірності n та локальні ваги відхилень w_i той же розмірності. Алгоритм складається з наступних кроків:

Крок 1. Побудова лінійної регресії в усіх n точках з використанням вагових функцій w_i, $i = 1 .. n$, одержання тим самим оцінок для параметрів моделі $<a_i, b_i>$, а також наближення $\hat{\mathrm{VOF}}_i = a_i \cdot \mathrm{RET}_i + b_i$.

Крок 2. Ініціалізація залишків $\varepsilon_i = |\hat{\mathrm{VOF}}_i - \mathrm{VQF}_i|$. Обчислення робастних ваг $\delta_i = K(\varepsilon_i)$, де $K(z) = \begin{cases} (1-|z|^2)^2, & |z| \le 1 \\ 0, & |z| > 1 \end{cases}$ – ядрова функція злагоджування.

Крок 3. Побудова лінійної регресії у всіх n точках, використовуючи вагові функції $\delta_i\, w_i$, $i = 1 .. n$, отримання тим самим оцінок для параметрів моделі $<a_i, b_i>$, а також наближення $\hat{\mathrm{VOF}}_i = a_i \cdot \mathrm{RET}_i + b_i$.

Крок 4. Обчислення нових значень робастних ваг $\delta_i = K(\varepsilon_i)$ за новим набором значень $\varepsilon_i = |\hat{\mathrm{VOF}}_i - \mathrm{VQF}_i|$.

Крок 5. Повторення кроків 3, 4 поки ваги δ_i не стабілізуються.

Як правило, цей процес сходиться досить швидко, зазвичай кількість ітерацій обмежується до 2-3.

Розглянутий алгоритм 3.6 реалізовано у розрахунковим скриптом в обчислювальному середовищі SciLab, програмний код скрипта наведений в додатку Б.4.

3.3. Інтегральна оцінка стану рослинності урбанізованої території

За результатами, отриманими з алгоритму 3.1 (LAI) та алгоритму 3.4 (VQF), по формулі (3.3) обчислюється інтегральна оцінка стану рослинності F всієї території:

$$F = \sum_i S_i \cdot \mathrm{LAI}_i \cdot \mathrm{VQF}_i \ , \qquad (3.3)$$

де додавання ведеться за маскою рослинності.

Проводиться векторизація маски рослинності, в межах якої векторизується розподіл інтегрального показника. ***Отже,*** в результаті підготовлено дані для картографічного представлення результатів.

3.4 Розробка алгоритму аналізу часових серій багатоспектральних космічних знімків

Постійне оновлення даних ДЗЗ надає достатнє інформаційне підґрунтя для оцінки не тільки сьогоденного (в даний момент) стану рослинності урбанізованих територій, але й визначення змін на протязі десятків років.

Проведення аналізу часових серій багатоспектральних космічних знімків вимагає створення універсального алгоритму, робота якого не залежить від різних вхідних даних. Так дослідження рослинності на місцевому рівні за декілька років виконується за допомогою інтегрального показника vegetation condition, тоді як дослідження великої міської агломерації на протязі десятків років можливе із залученням лише індексу листкової поверхні.

Алгоритм аналізу часових серій космічних знімків заснований на методах, описаних в підрозділі 2.4.

Алгоритм 3.7. Алгоритм аналізу часових серій багатоспектральних космічних знімків складається з наступних кроків:

Крок 1. Вибір знімків території дослідження, що містять часову серію.

Крок 2. Підготовка та попередня обробка відібраних знімків.

Крок 3. Перетворення зображень часової серії на просторовий розподіл показника, що буде досліджуватися – кількість рослинності за LAI, або якість рослинності за VQF, або комплексний показник стану рослинності.

Крок 4. Обробка часової серії для одержання параметрів тренду (середнє значення, середньорічний приріст) та періодики (резонансу, характерного періоду) описаних в п.2.4.2.

Крок 5. Вивід результатів обробки.

Розглянутий алгоритм 3.7 реалізовано у вигляді розрахункового скрипту в обчислювальному середовищі SciLab, який наведено в додатку Б.5.

3.5 Розробка загальної методики автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків

Одержані за вищевикладеними алгоритмами геопросторові продукти є основою для інтегрального кількісно-якісного оцінювання рослинності урбанізованих територій та дослідження її змін з часом. Необхідну для цього послідовність технологічних операцій обробки багатоспектральних космічних зображень подано на рис.3.2.

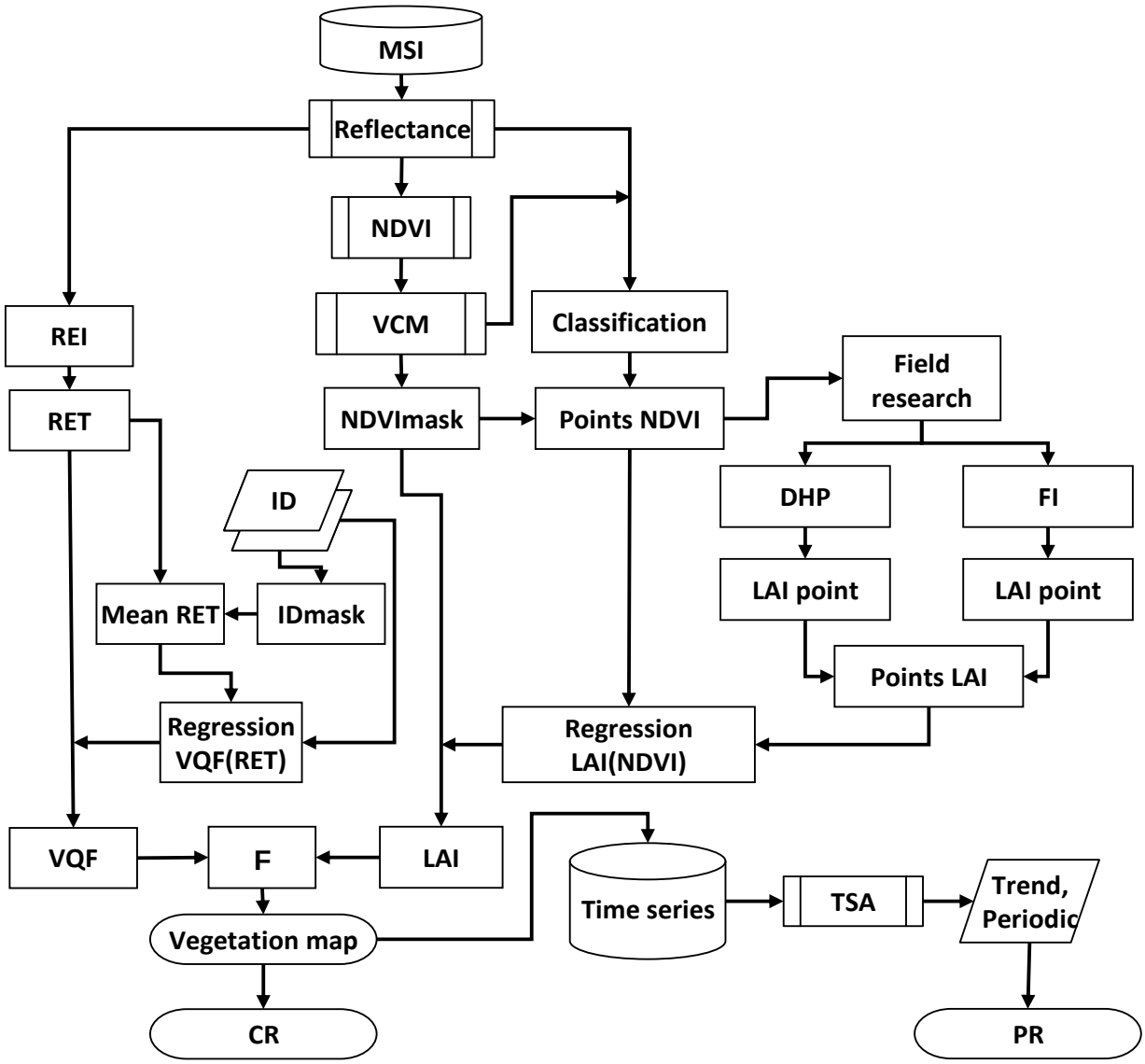


Рис.3.2 Схема операцій оцінювання стану рослинності за багатоспектральним зображенням

Вхідне радіометрично каліброване багатоспектральне зображення MSI (multispectral image) з урахуванням умов освітленості та поглинання атмосфери перераховується на спектральне відбиття земної поверхні (Reflectance). Далі обробка ведеться паралельно по двох гілках: якісного оцінювання та кількісного оцінювання.

Продуктом першої є нормована якість рослинності VQF, одержувана через екстремум похідної в зоні червоного краю RET, який, в свою чергу, розраховується за інтерполяцією спектрального відбиття в зоні червоного краю REI. Залежність VQF від RET відновлюється шляхом співставлення таксаційних даних (ID) по виділах та середнього значення RET в межах цих виділів.

Продуктом другої є листковий індекс LAI, одержуваний через вегетаційний індекс NDVI в межах маски рослинності VCM (vegetation cover mask). Залежність LAI від NDVI відновлюється за даними підсупутникових спостережень (field research) на тестових ділянках території дослідження.

Наступним кроком є розрахунок інтегрального показника стану рослинності всієї території *F* (формула 2.1) та підготовка даних для картографічного представлення результатів.

При тривалому дослідженні стану рослинності формуються часові серії кількісно-якісних характеристик (time series), які оцінюються за основними параметрами тренду – середнім значенням, середньорічним приростом, а також періодики – резонансом, характерним періодом.

Завершальним кроком є розробка поточних (CR) та перспективних (PR) рекомендацій щодо використання розробленої методики.

Висновки до третього розділу

1. Розроблено алгоритм оцінки кількості рослинності урбанізованих територій на основі побудови робастної регресії та використанні індексу листкової поверхні LAI.

2. Розроблено алгоритм оцінки якості рослинності урбанізованих територій, який використовує метод оптимальної сплайн-інтерполяції, а також новий показник – величину екстремуму похідної спектрального відбиття в зоні червоного краю 0,68-0,73 мкм.

3. Розроблено алгоритм виявлення просторово-часових тенденцій змін рослинного покриву з використанням їх довготривалих часових серій багатоспектральних космічних знімків. Основними показниками, що при цьому оцінюються та картуються, визначено параметри лінійного тренда та періодичної компоненти показників стану рослинності.

4. Розроблено комплексну методику автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків, яка поєднує в собі всі вищерозроблені проміжні методики та алгоритми.

РОЗДІЛ 4

ВАЛІДАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ

Організація спостереження за станом природних територій міста дозволяє дати об'єктивну оцінку їх змін, прогнозувати їх розвиток або деградацію, визначити розмір екологічного, економічного і соціального збитку, оперативно вирішувати питання управління, оптимізації фінансування проектних та експлуатаційних заходів.

4.1 Оцінка стану рослинності тестових ділянок в межах м. Києва

Територіально місто Київ розташоване на межі двох природно-кліматичних зон України – Полісся (північна частина) та Лісостепу (південі території). Це зумовлює особливості одного з основних природних компонентів міських територій – рослинності, розподіл і видовий склад якої залежить, насамперед, від характеру грунтового покриву.

Так у розташованих в північній частині міста великих масивах Святошинського та Пуща-Водицького соснових і мішаних лісів переважають характерні для зони Полісся рослинні форми. Для околиць Києва характерна поліська флора з борами та суборами, яка на Лівобережжі Дніпра представлена боровими терасами.

Природна рослинність у південих околицях міста, до яких прилягає Голосіївський ліс, має інший характер. Своїми природними особливостями ці типові грабово-дубові деревостани на сірих лісових грунтах належать до природно-кліматичної зони – лісостепу.

Невелика частина зелених насаджень міста Києва являє собою залишки природних лісових масивів, які раніше займали територію сучасного міста. Однак більшість із них є штучними насадженнями, створеними в процесі забудови міської території [32].

4.1.1. Комплекс підсупутникових спостережень на території досліджень

Для завірки регресійних залежностей LAI(NDVI) для різних типів рослинності був проведений комплекс підсупутникових спостережень на території НПП “Голосіївський” та “Біличанського лісу” КП“Святошинське ЛПГ”.

На рис 4.1. представлений графічно часовий розподіл космічних знімків Landsat TM, щодо яких проводились підсупутникові спостереження.

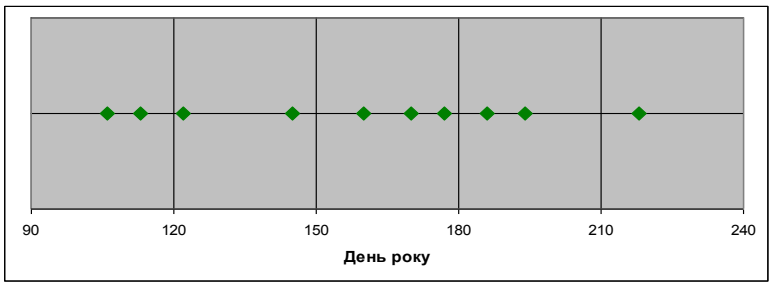


Рис.4.1. Часовий розподіл супутникових знімків, використаних в дослідженні

Обрані знімки було проаналізовано та за алгоритмом 3.1 було проведено попередню обробку (крок 2), визначено розподіл NDVI (крок 3) та обрано характерні пікселі (алгоритм 3.2., крок 1,2) для проведення підсупутникових спостережень. Координати точок дослідження представлені в додатку А (табл.А.1.). Картосхема польових вимірювань на тестових ділянках, позначених на рис 4.2 як L5 … L40, наведена в додатку А (рис.А.1).

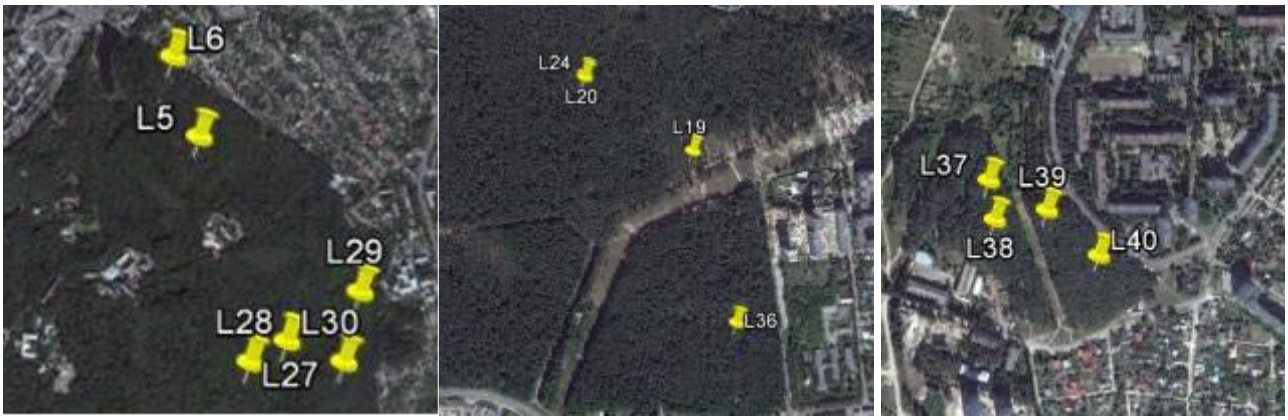


Рис.4.2. Марштури польових вимірювань: НПП “Голосіївський”, “Біличанський ліс” КП“Святошинське ЛПГ”

Вимірювання на ділянках проводились фотометричним та геометричним методами, описаними в пункті 2.2.2. за схемою, зображеною на рис.2.4.

За фотометричним методом польовим люксметром Sinometer LX1010B визначалась освітленість Φ під пологом дерев та освітленість Φ_0 на відкритій місцевості, що відповідає освітленості над деревами. Журнал польових вимірювань та результати камеральної обробки наведені в додатку А.2 (табл.А.2.1-А.2.16).

Для обчислення LAI геометричним методом проводилось фотографування картини розподілу світла під пологом дерев. Через відсутність об'єктиву "риб'яче око", який надав би одразу напівсферичні фотографії, робили низку знімків, з яких потім в програмному продукті отримували панораму точки зйомки. Всього було отримано 378 напівсферичних панорамних зображень в точках вимірювань, 36 найбільш характерних з них наведено в додатку А.3, рис.А.3.1-А.3.3.

Кінцеві зображення напівсферичних панорам було проаналізовано в програмному середовищі GLA (рис.4.3) та визначено значення LAI.

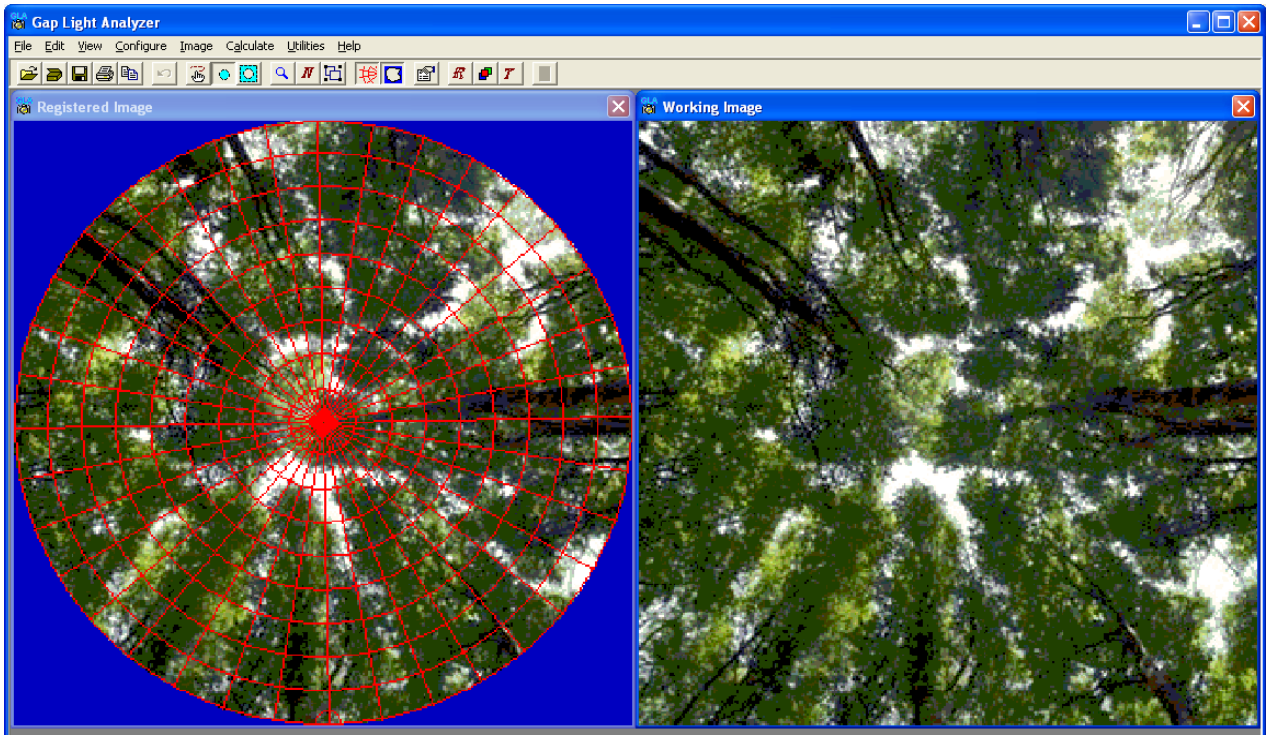


Рис.4.3. Обробка знімків DHP в програмному продукті GLA

Зведені результати камеральної обробки напівсферичних панорамних зображень наведено в додатку А.2.

За даними вимірювань були побудовані методом оптимальної сплайн-інтерполяції регресії LAI(NDVI) (Рис.4.4-4.6).

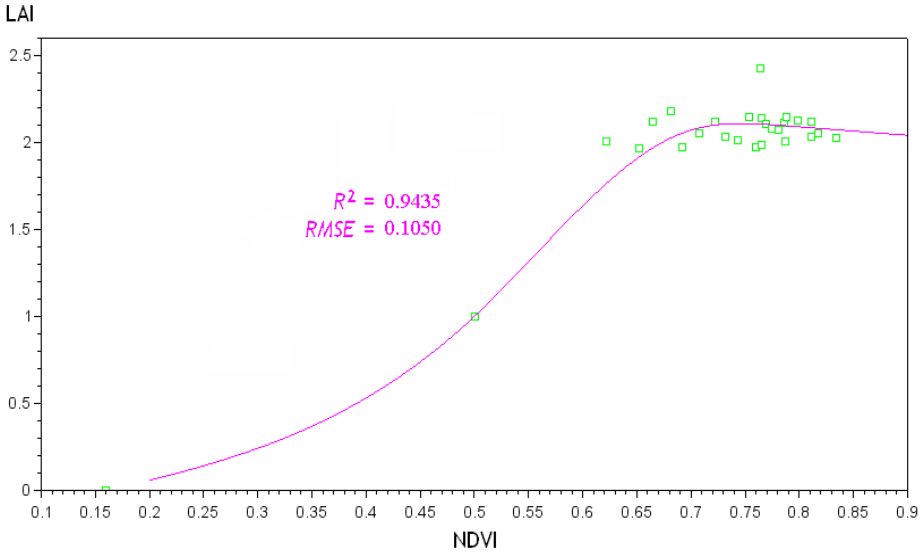


Рис.4.4. Регресійні залежності LAI(NDVI) для листяних порід

Через відсутність космічних знімків, придатних для умов дослідження, на початку вегетаційного періоду та значний вплив підліску не було можливості порівняти наземні данні з супутниковими.

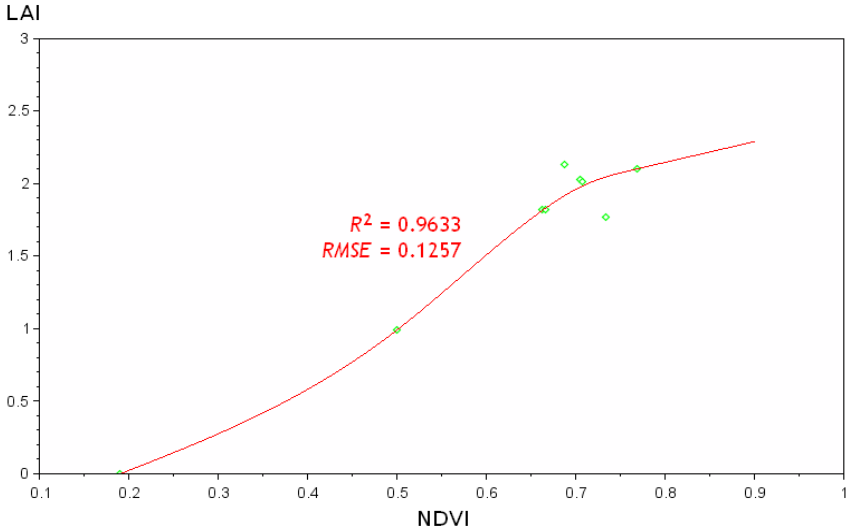


Рис.4.5. Регресійні залежності LAI(NDVI) для ділянок з мішаною рослинністю

Через перевагу листяних порід на ділянках з мішаною рослинністю, регресійна залежність LAI(NDVI) подібна до суто листяних ділянок.

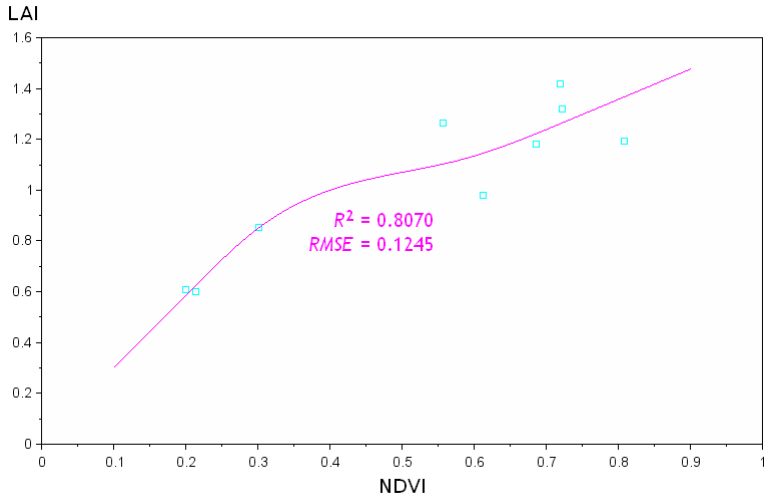


Рис.4.6. Регресійні залежності LAI(NDVI) – для хвойних порід

Для складання регресійних залежності для ділянок з хвойними насадженнями необхідно вибирати точки з мінімальним підліском.

4.1.2. Визначення індекса листкової поверхні за космічними знімками середньої просторової розрізненності

Для дослідження було вибрано частину території Шевченківського та Подільського районів міста Києва. Тут неозброєним оком можна побачити значне збільшення щільності забудови по вулицях Воздвиженській та Кожум'яцькій протягом десятиліття. З метою аналізу змін рослинного покриву у часі було використано два багатоспектральні космічні знімки: Landsat-7/ETM+ від 07.06.2000 р, та EO-1/ALI від 15.04.2011 р.

Для оцінки LAI використовувалися методи, описані в підрозділі 2.2. Розрахунки проводились за алгоритмом 3.1.

Порядок розрахунків ілюструється рис.4.7, де показано два вертикальних ланцюжки обробки вхідних багатоспектральних космічних зображень території досліджень: для Landsat-7/ETM+ (07.06.2000) – лівий, та EO-1/ALI (15.04.2011) – правий.

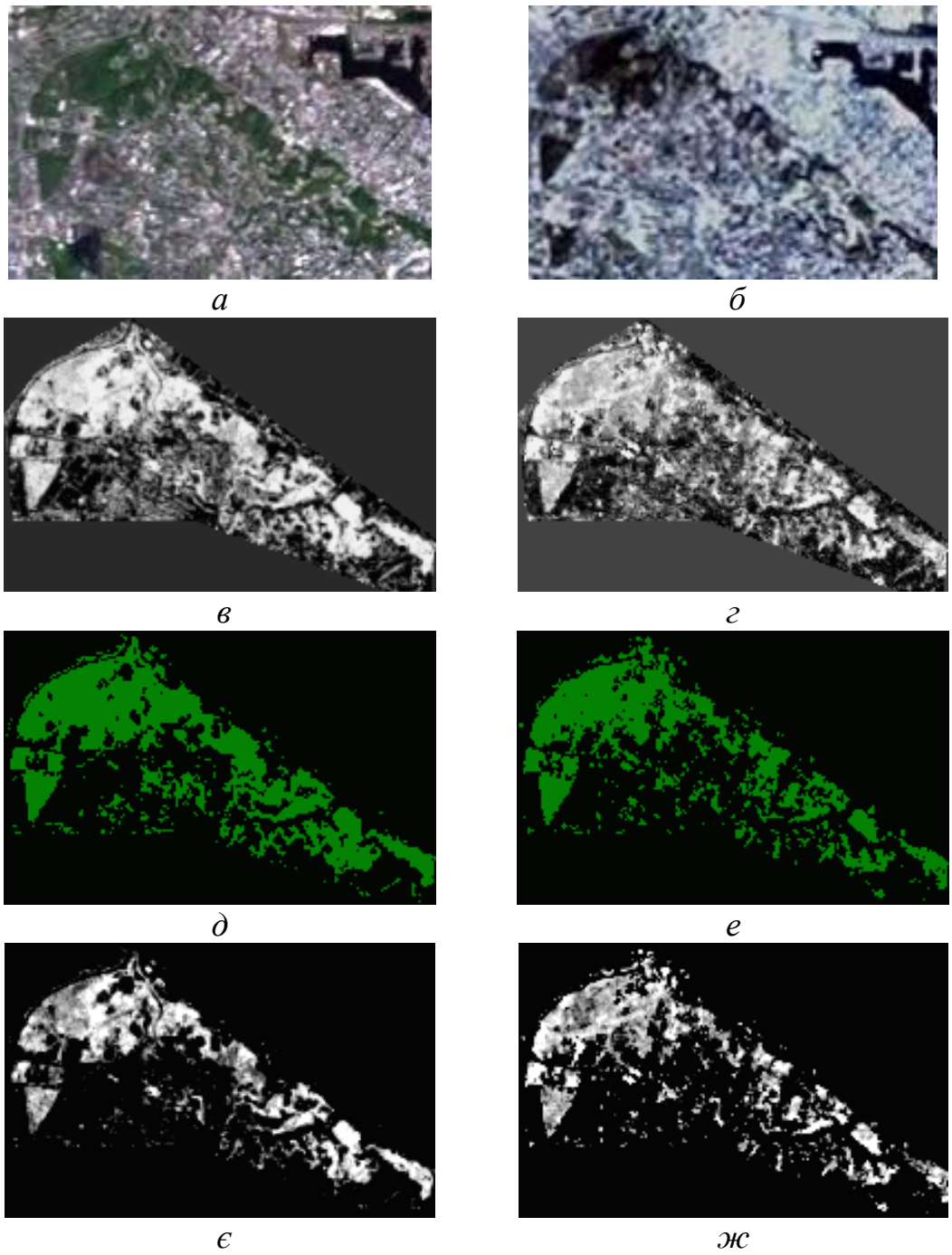


Рис.4.7. Послідовність обробки багатоспектральних космічних зображень для оцінювання кількості рослинності: *а*,*б* – вихідні кольоровосинтезовані зображення; *в*,*г* – просторовий розподіл NDVI; *д*,*е* – маска проективного покриття рослинності; *є*,*ж* – просторовий розподіл LAI

Застосування формули (3.1) до зображень рис.4.7*є* та рис.4.7*ж* дозволяє одержати підсумкові оцінки кількості рослинності в межах території дослідження з урахуванням LAI. Результати оцінювання зведено до табл.4.1. Загальна площа території дослідження складає 1089,36 га.

Таблиця 4.1

Оцінка кількості рослинності території дослідження за даними ДЗЗ

Дата оцінювання	Площа проективного покриття рослинності, га	Площа рослинності з урахуванням LAI, га
07.06.2000	454,68	444,57
15.04.2011	380,16	131,20

За результатами оцінювання можна зробити висновок про зменшення площі проективного покриття зелених насаджень з 0,42 м^2 на один м^2 загальної території до 0,35 м^2. Повна площа зелених насаджень з урахуванням LAI в 2000 році становила 0,41 м^2 на один м^2 загальної території. Відзначимо, що значне зменшення кількості рослинності в 2011 році до 0,12 м^2 на один м^2 обумовлене початком вегетаційного періоду. Порівняння кількості рослинності протягом декількох років та визначення динаміки її змін із застосуванням дистанційних даних та сучасних геоінформаційних технологій є дуже корисним та ефективним для планування робіт з озеленення та догляду за рослинністю у місті.

4.1.3. Визначення індекса листкової поверхні за космічними знімками високої просторової розрізненності

В ході досліджень супутникового знімку Pléiades-1A було прокартовано рослинність в межах дослідної ділянки. Розроблена геоінформаційна технологія з використанням LAI дозволяє врахувати фазу фенологічного циклу. Це забезпечує більш точні оцінки кількості рослинності в конкретний момент часу та її зміни з плином часу.

В дослідженні використовувався знімок високої просторової розрізненності Pléiades-1A, дата зйомки 22.04.2013.

Дані характеризуються широкою смугою зйомки (20 км), високою точністю геопозиціонування – меньше 4,5 м (CE90) без використання наземних

опорних точок. Просторова розрізненність панхроматичного канала знімка 0,7м (після обробки – 0,5 м), спектральних каналів – 2,8 м (після обробки 2,0 м).

Для оцінки кількості рослинності на момент зйомки була обрана нормативна площа НПП «Голосіївський» та парка ім.М.Рильського [24].

Файлові значення (DN) знімка були перераховані в одиниці спектральної щільності енергетичної яскравості на сенсорі. Була проведена атмосферна корекція та отримані значення коефіцієнта відбиття на землі (Рис. 4.8).

Рис.4.8. Вихідний супутниковий знімок з рамкою (білі лінії) зелених зон міського парку

Знімок було обрізано по масці, побудованої на основі даних про зелені зони (парки) у межах території досліджень, для виключення великих зон промислової та житлової забудови. За отриманими даними розрахували NDVI і за допомогою дерева рішень прокартували ділянки рослинності (Рис.4.9).

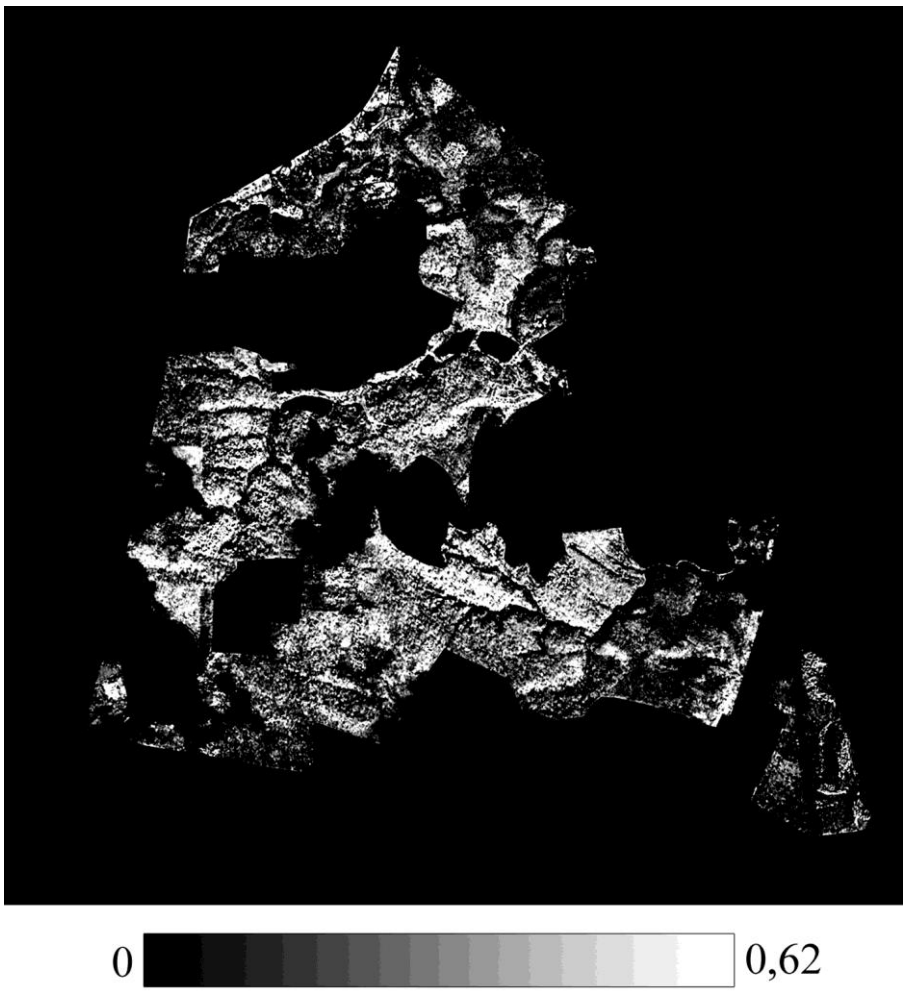


Рис.4.9. Розподіл NDVI в межах маски рослинності

У зв’язку з відмінностями фенофаз основних рослинних угруповань, використовувалась осереднена регресійна залежність LAI(NDVI). Оцінка LAI проводилась фотометричним методом [23]. Панорамна зйомка здійснювалася фотоапаратом.

Отримано замкнута геоінформаційна технологія для інтегральної кількісної оцінки рослинності урбанізованих територій [5], яка за вихідними знімкам шляхом операцій на рис.3.1. дозволяє отримати розподіл LAI (рис.4.10) в рамках території досліджень.

Попередній аналіз розподілу LAI (рис.4.10) дозволяє виділити характерні ділянки хвойної і вічнозеленої рослинності. Також проглядається активне зростання підліску та його вплив на збільшення загального значення LAI.

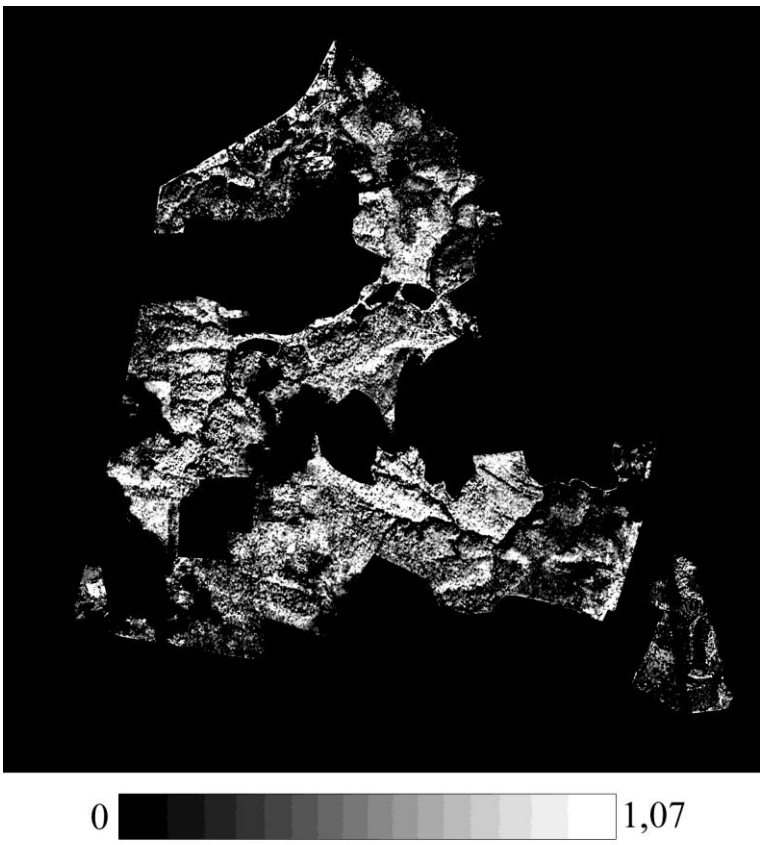


Рис.4.10. Просторовий розподіл LAI в межах територій досліджень

Рис. 4.11 ілюструє порівняння показників кількості рослинності, отриманих різними методами.

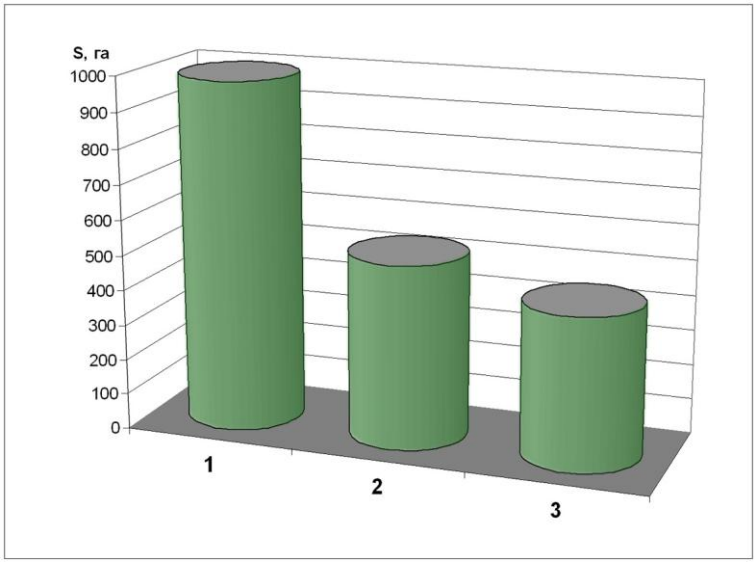


Рис.4.11. Площа рослинності: 1 – нормативна площа зелених зон території дослідження; 2 – площа проективного покриття рослинності, розрахована за допомогою NDVI; 3 – площа рослинності, отримана за результатами оцінки LAI

Методика розрахунку площі рослинності в межах землекористувань дає необ'єктивні показники кількості зеленої маси та її стану. Напочатку вегетаційного періоду нормативні площі зелених зон набагато більше реальної кількості рослинності.

Використання показника NDVI дозволяє більш точно визначити межі рослинності і площу проективного покриття. Розроблена геоінформаційна технологія з використанням LAI дозволяє підлаштуватися під фазу фенологического циклу. Це дозволяє більш точно оцінювати кількості рослинності в конкретний момент часу і його зміни з плином часу

В результаті досліджень отримано новий інформаційний інструмент виявлення просторово-часових тенденцій рослинного покриву, який є необхідним для підтримки науково-обґрунтованих управлінських рішень керування містом. Розроблено цілісну геоінформаційну технологію, яка дозволяє забезпечити міську владу та осіб, які приймають рішення відносно розвитку інфраструктури зелених насаджень, оперативною та достовірною дистанційною картографічною інформацією про поточний стан та тенденції змін рослинності в місті.

4.1.4. Оцінка якісного стану рослинності за багатоспектральними супутниковими знімками та наземними завірковими даними

Насьогодні оцінка стану рослинності є досить складним завданням. Воно включє в себе аналіз великого набору різнорідних, погано формалізуємих, а іноді навіть суперечливих показників, необхідність залучення експертів, а отже – суб’єктивних оцінок та впливу людського фактору. Дослідження значних територій трудомістке та витратне, тому оперативність актуалізації даних буде досить низькою. Одним зі способів пом’якшення вказаних труднощів є залучення дистнційних даних, а саме супутникових знімків середньої просторової розрізненності [9].

Сучасні методи оцінки якості рослинності можна розділити на наземні та супутникові. Наземні методи, засновані на визначенні таксаційних даних та

ландшафтній оцінці, надають усереднені показники якості, вербальні та сповнені протиріч. Методи засновані на супутникових даних використовують такі якісні показники, як вміст хлорофілу, газообмін, тощо [32].

В роботі було зроблено спробу перевести експертні методи оцінки якості рослинності на кількісну геоінформаційну основу.

4.1.4.1. Територія дослідження

Дослідження проводилось на території Національного природного парку (НПП) “Голосіївський”, який було створено Указом Президента України № 794/2007 від 27 серпня 2007 року в межах Голосіївського району міста Києва. Указом Президента України від 1 травня 2014 р. № 446/2014 територію НПП “Голосіївський” розширено на 6462,62 гектара за рахунок земель Святошинського лісопаркового господарства без вилучення в землекористувача.

НПП “Голосіївський” є багатофункціональною установою природно-заповідного фонду з наступними основними напрямками роботи: природоохоронним, науково-дослідним, рекреаційним, еколого- та культурно-освітнім. Відповідно до ст. 21 Закону України “Про природно-заповідний фонд України”, на території НПП “Голосіївський” встановлено диференційований режим та проведено функціональне зонування, яке включає чотири функціональні зони: заповідну, регульованої рекреації, стаціонарної рекреації та господарську.

В природному відношенні територія НПП складається з п’яти відокремлених лісових масивів. Лісові екосистеми займають більше 90% території парку. НПП “Голосіївський” – єдина в Україні установа природно-заповідного фонду вищого рангу, яка знаходиться в межах мегаполіса.

Національний природний парк розташований в правобережній частині м. Києва, на крайній півночі лісостепової зони. Приєднана у 2014 році територія із мішаними лісами належить до фізико-географічної області Київського Полісся. Південна частина парку – це піщані надзаплавні тераси Дніпра, вкриті переважно сосновими та сосново-дубовими лісами. У долині невеликої річки

Віти, що перетинає ці тераси, зберігся значний масив лісових боліт. Північніше, у невеликому урочищі Бичок присутні широколистяні лісові природні комплекси заплави Дніпра.

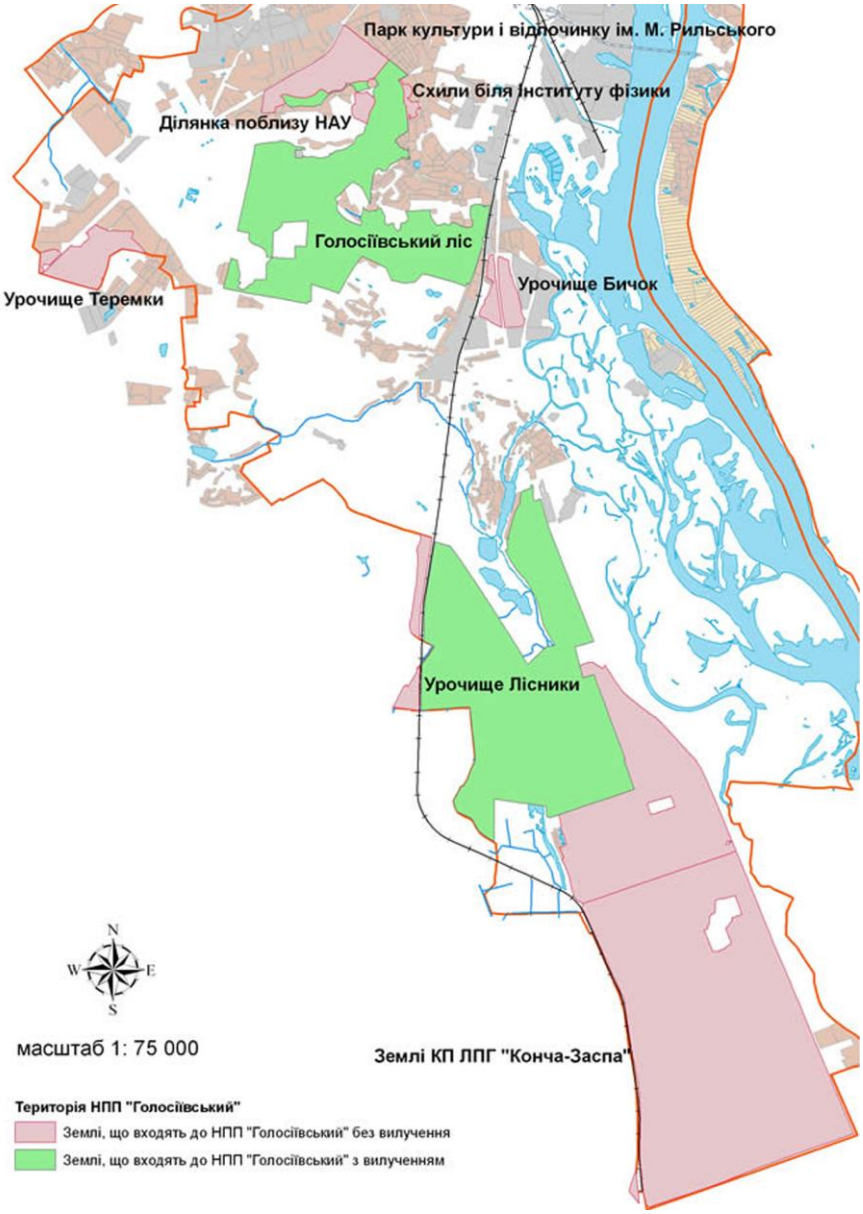


Рис.4.12. Загальна схема розміщення території НПП “Голосіївський”

Центральна частина парку включає збережені ділянки широколистяних лісів фізико-географічної області Київського плато – урочища Голосіївський ліс (разом із прилеглим Голосіївським парком ім. Максима Рильського) та Теремки. Саме Голосіївський лісовий масив був обраний для проведення досліджень як найбільш відвідуваний та оточений забудовою.

4.1.4.2. Дані, використані в дослідженні

В дослідженні було використано фрагмент багатоспектрального космічного знімка середньої просторової розрізненності «Січ-2»/МСУ, який було отримано 1 вересня 2011 року в чотирьох спектральних діапазонах: зеленому, червоному, ближньому інфрачервоному та середньому інфрачервоному. Також були опрацьовані наступні дані наземних спостережень: проект організації території національного природного парку «Голосіївський», охорони, відтворення та рекреаційного використання його природних комплексів і об’єктів [149], а також проект організації та розвитку лісового господарства КП ЛПГ «Конча-Заспа», які включають в себе таксаційний опис, відомості поквартальних підсумків, інше [150].

На рис. 4.13 представлена графічна інтерпретація розподілу груп типів ландшафту (за М.М. Тюльпановим) та ландшафтних показників.

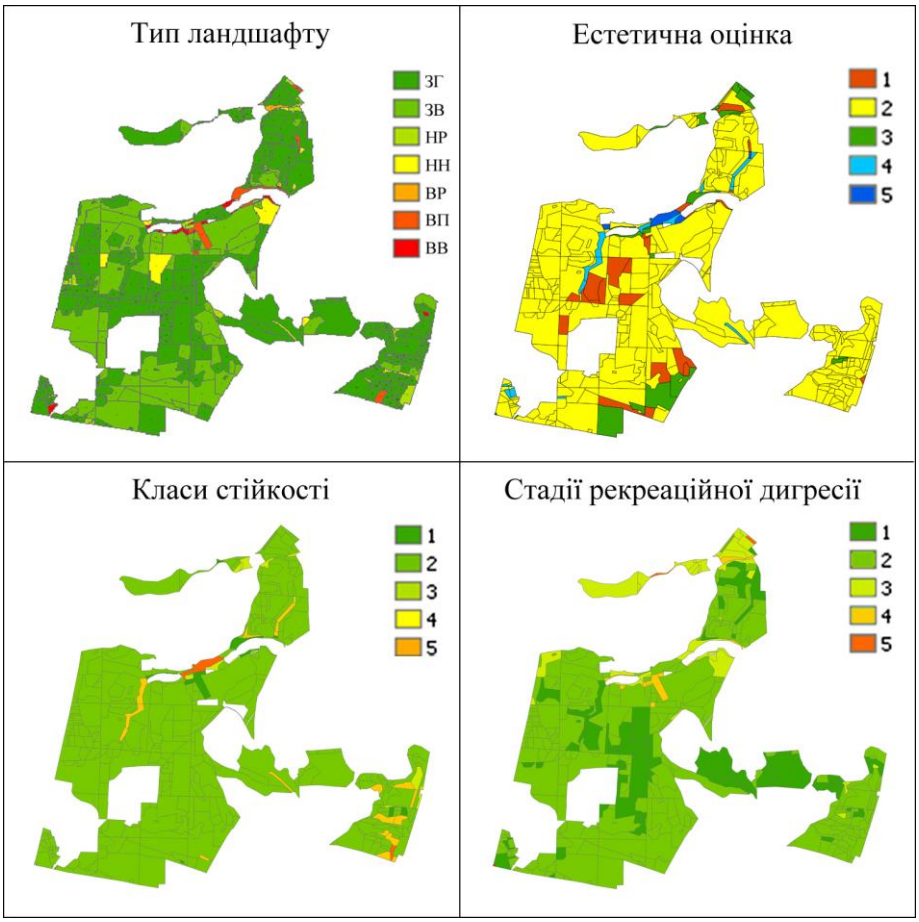


Рис. 4.13. Інтерпретація розподілу ландшафтних показників в геоінформаційному середовищі

4.1.4.3. Розрахунки та інтерпретація результатів

Раніше було розроблено загальну схему визначення стану рослинності за даними супутникових зйомок, яку реалізовано у вигляді цілісної геоінформаційної технології починаючи від каліброваних космічних знімків та закінчуючи картосхемами з рекомендаціями [11] (підрозділ 3.4.). В даному дослідженні основну увагу приділено її найбільш складній підсистемі, що реалізує оцінювання якості рослинності (підрозділ 3.2).

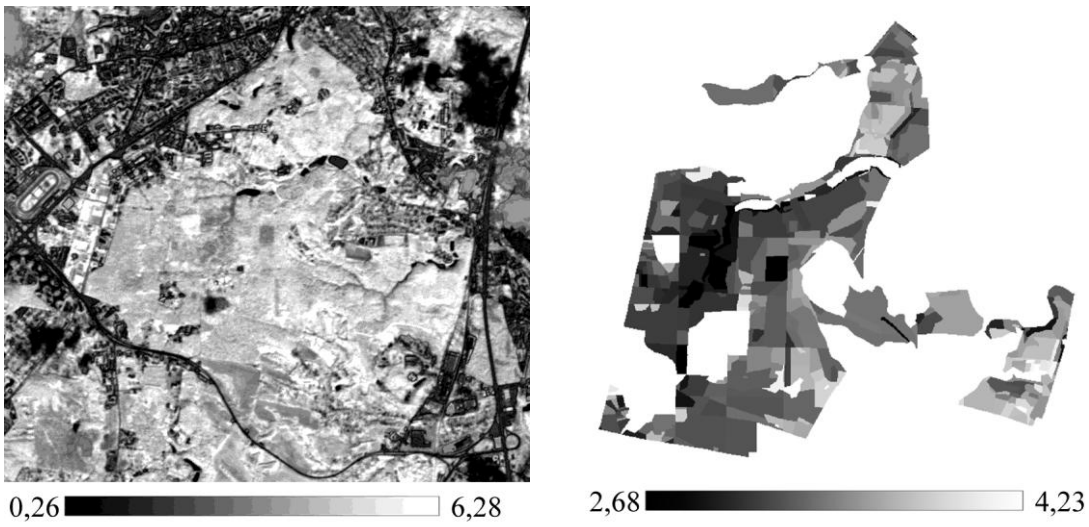
Дослідження проводилось за алгоритмами 3.3, 3.4, описаними в третьому розділі. Алгоритм 3.5 оптимальної сплайн-інтерполяції та обчислення RET з урахуванням специфікацій спектральних діапазонів конкретного багатоспектрального сенсора (в даному дослідженні – “Січ-2”/МСУ) реалізовано в обчислювальному середовищі SciLab (додаток Б.3).

Так, для “Січ-2”/МСУ фіксація значень похідних спектральної кривої за межами зони червоного краю здійснювалася на основі значень відбиття в додаткових робочих спектральних діапазонах: зеленому ліворуч та середньому інфрачервоному праворуч.

Спершу було виділено фрагмент каліброваного космічного знімку “Січ-2”/МСУ, що відповідає території дослідження. Виконано атмосферну корекцію зональних зображень, їх перераховано на відповідні коефіцієнти відбиття земної поверхні. Далі за пороговим значенням NDVI побудовано маску рослинності та відокремлено елементарні ділянки рослинних угруповань (виділи), на які наявні дані наземної завірки.

За алгоритмом оптимальної сплайн-інтерполяції визначено піксельні значення RET в межах маски рослинності (рис.4.14 а). Потім для кожного виділу було визначено середнє значення RET (рис.4.14 б).

На основі показників ландшафтної оцінки було проведено нормалізацію статистичних вибірок та за алгоритмом 3.7 побудовано робастну регресійну залежність, показану на рис.4.15 з відомими класами якості рослинності, які було описано безрозмірним процентним показником VQF.



а б

Рис. 4.14. а - Просторовий розподіл RET – екстремуму похідної в зоні червоного краю; б - Розподіл середнього значення RET по виділах

Рис.4.15. Регресійна залежність VQF(RET)

Одержана регресія дозволила обчислити значення VQF в тих частинах знімку, де наземні завіркові дані відсутні.

За алгоритмом 3.4 отримано картосхему нормованого розподілу якості рослинності VQF території дослідження за супутниковими даними (рис.4.16). Для покращення візуального сприйняття вона розподілена на 5 класів та порівняна з розподілом такого показника ландшафтної оцінки як стадія рекреаційної дигресії, тому що рекреаційне навантаження суттєво впливає на стан рослинності [151].

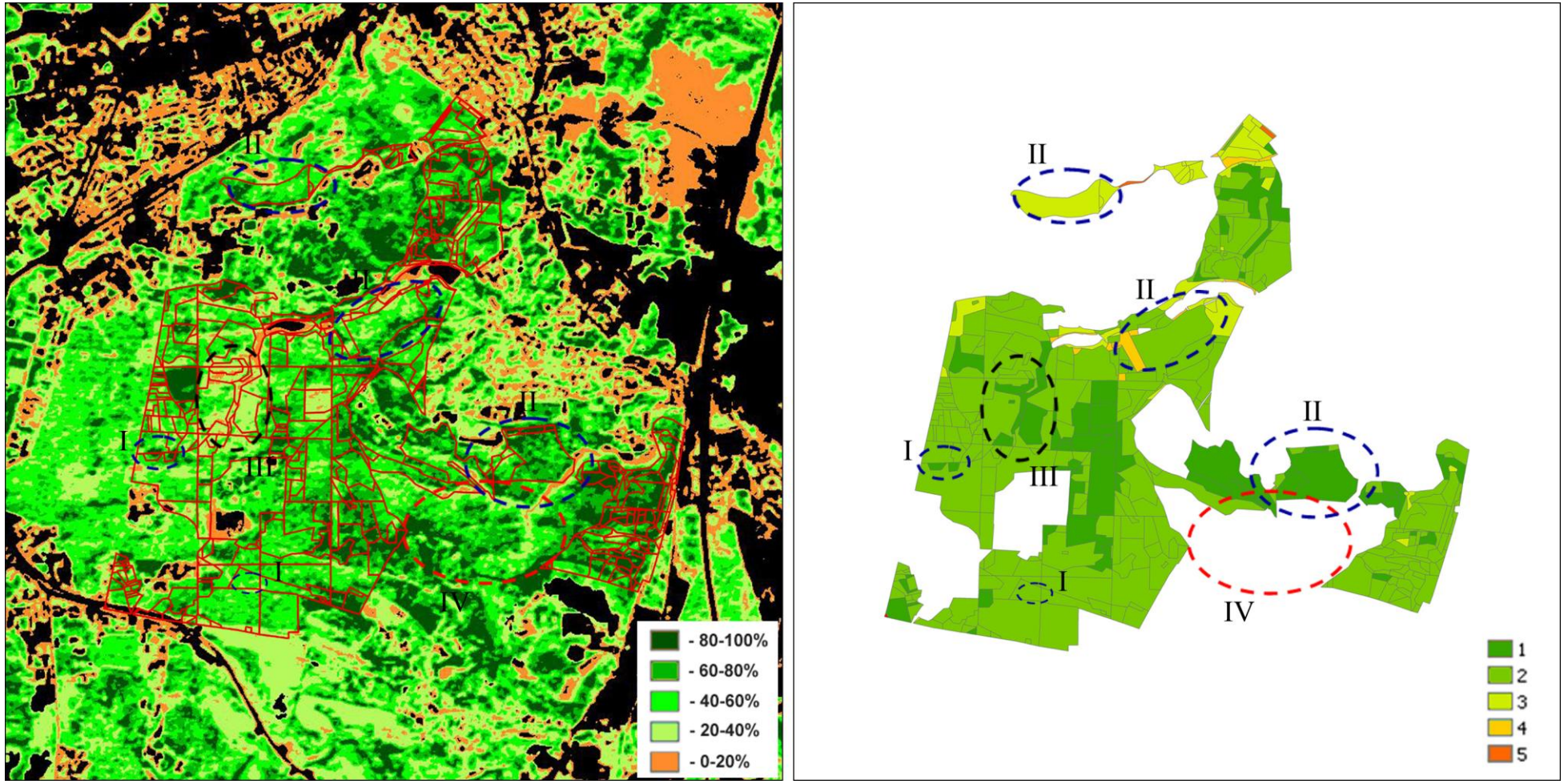


Рис.4.16. Картосхема розподілу показників стану рослинності за супутниковими даними та даними наземних спостережень

Аналіз отриманих розподілів показує, що середні значення RET невеликих виділів (I) достатньо чітко співпадають з наземними даними. Це пояснюється узгодженістю просторового розрізнення знімка та картосхеми, а також тим що в межах декількох пікселів не спостерігається значної варіабельності значень RET.

На наступних ділянках (II) можна відмітити значну відповідність наземним даним. Разом з тим очевидною перевагою результатів отриманих за супутниковими даними є виявлення неоднорідності якості великих виділів у порівнянні з узагальненими показниками ландшафтної оцінки. Це зумовлено як видовою різноманітністю в межах виділу, так і наявністю невеликих за розміром проблемних ділянок, які важко визначаються візуально на місцевості та/або не враховуються при інтегральній експертній оцінці.

III варіант – це суттєва розбіжність результатів за супутниковими та наземними даними. Даний випадок є підставою до додаткового наземного обстеження проблемної ділянки та визначення природи розбіжності оцінок якості.

І нарешті перевагою використання супутникових даних стала можливість отримати відносні показники якості рослинності на територіях (IV) де не проводились роботи з ландшафтної оцінки. Так, в даному випадку, це територія заповідної зони національного природного парку «Голосіївський» де збереглись природні рослинні угруповання, а також рослини та тварини, які занесені до Червоної Книги України.

4.1.5. Визначення загального показника стану рослинності для багатоспектральних зображеннь з супутників “Січ-2” та RapidEye

В 2008 році було успішно запущено і виведено на навколоземну сонячно-синхронну орбіту висотою 630 км угруповання з 5 міні-супутників ДЗЗ серії RapidEye. Параметри самих супутників та їх знімальної апаратури добре підходять для дистанційного вивчення рослинності через наявність окрім 4 загальноприйнятих (blue, green, red, NIR) додаткового робочого спектрального

діапазону 0,69-0,73 мкм (red edge). Тому багатоспектральні зображення RapidEye (http://www.blackbridge.com/rapideye/products/basic.htm) широко і ефективно використовуються в сільському та лісовому господарствах, картуванні екосистем, охороні природи.

Застосування знімків RapidEye також є дуже корисним і для оцінювання стану рослинності в міських агломераціях. Для цього застосовуються стандартні алгоритми виділення рослинності за пороговими значеннями вегетаційного індексу NDVI, класифікація рослинних біотопів за спектральними сигнатурами, визначення повної площі листяного покриву за фітометричним показником LAI, аналіз довготривалих змін за часовими серіями багатоспектральних зображень.

Особливістю супутникових даних RapidEye є їх природна пристосованість для оцінки якісного стану рослинності за її спектральною відбивною здатністю в зоні червоного краю (рис.4.17).

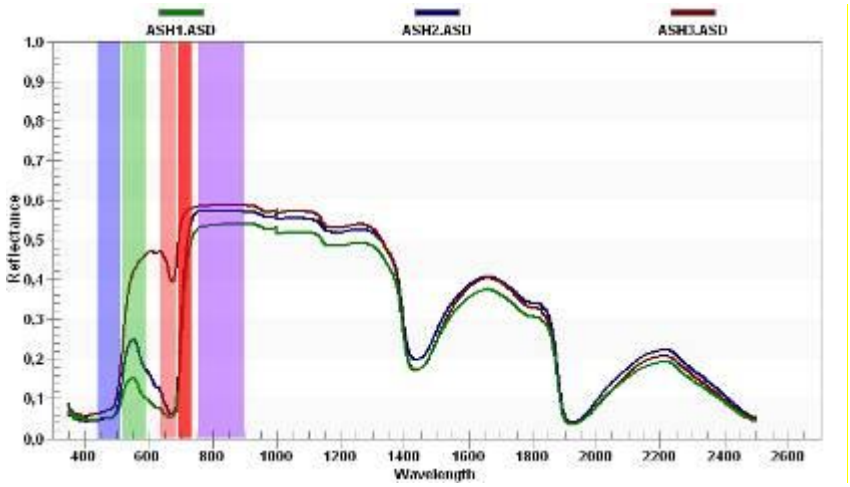


Рис.4.17. Спектральні діапазони сенсора RapidEye/JSS

Для цього було застосовано інтерпольовану величину першої похідної кривої спектрального відбиття рослинності. За наземними спостереженнями на еталонних ділянках було відновлено нелінійну регресійну залежність нормованої якості рослинності від цієї величини.

За алгоритмами, описаними в третьому розділі, був проведений аналіз космічного знімку RapidEye, результати якого представлені на рис.4.18.

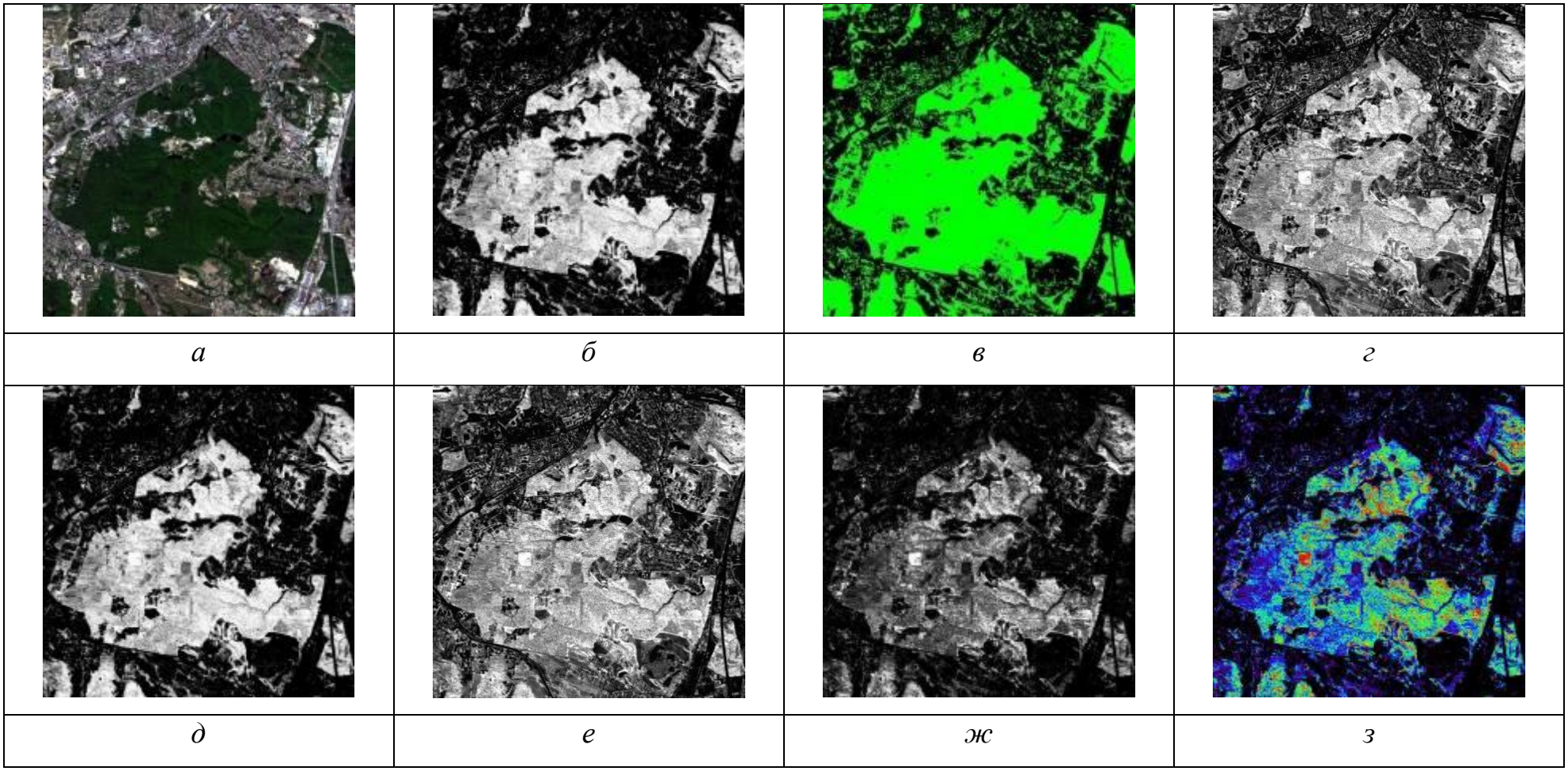


Рис.4.18. Результати обробки багатоспектрального зображення знімка RapidEye/JSS НПП “Голосіївський”:

а – фрагмент каліброваного багатоспектрального знімка RapidEye/JSS, 07.05.2013, просторова розрізненність 6,5 м;

б – вегетаційний індекс NDVI; *в* – маска рослинності; *г* – індекс листкової поверхні; *д* – спектральне відбиття в зоні червоного краю; *е* – екстремум похідної в зоні червоного краю ; *ж* – нормована якість рослинності ;

з – інтегральна оцінка стану рослинності

Визначення загального показника стану рослинності проводилося на прикладі Голосіївського лісопарку м. Києва із застосуванням фрагмента багатоспектрального супутникового зображення “Січ-2”/МСУ (рис.4.19) за 05.10.2011 р., який було відкалібровано методами, описаними в підпункті 2.1.2.1.

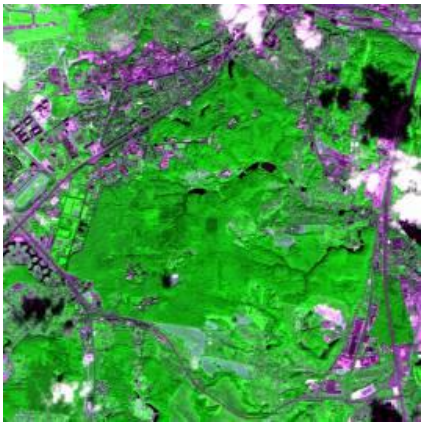
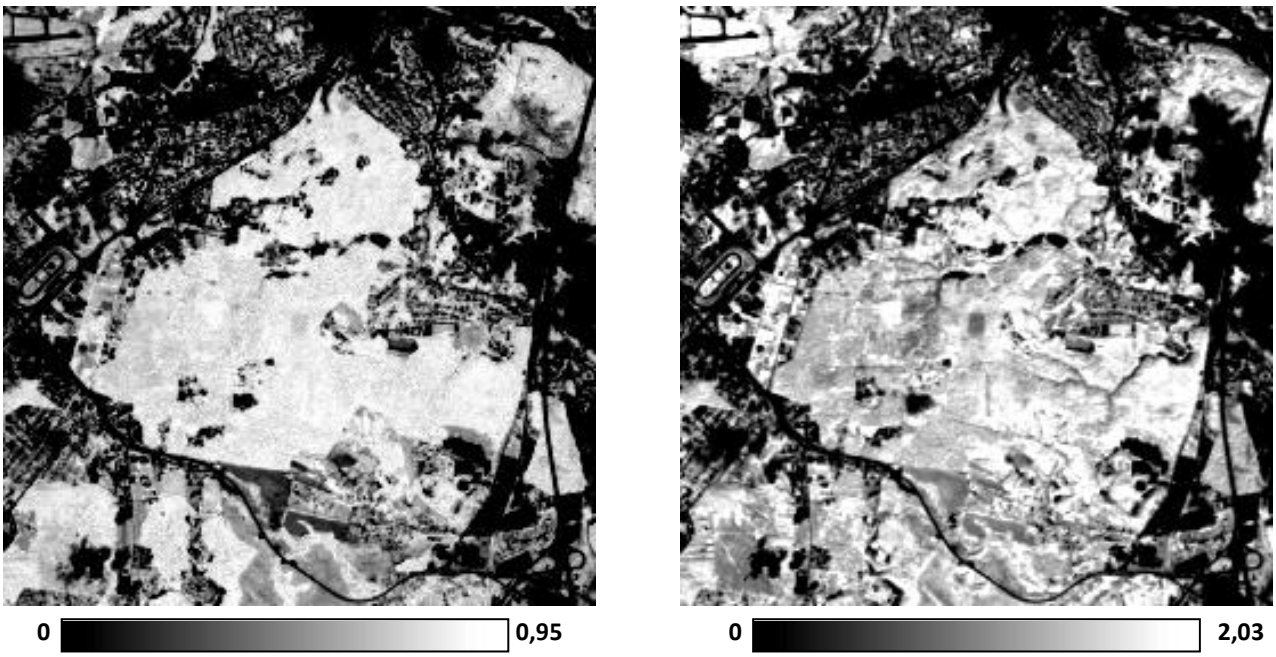


Рис.4.19. Фрагмент каліброваного знімка “Січ-2”/МСУ 01. 09.2011 (просторова розрізненність 8 м)

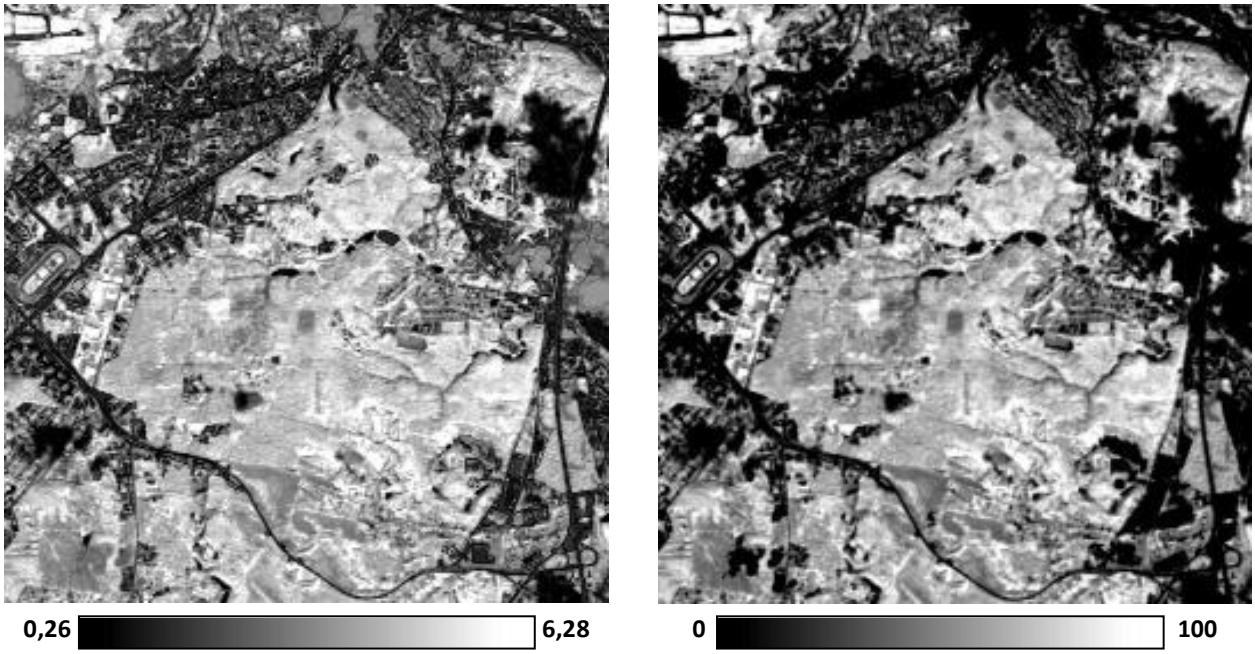
Спершу було застосовано субметодику для визначення кількості рослинності. Отримані в результаті розподіли NDVI та LAI зображені на рис.4.20.



а б

Рис.4.20. Просторові розподіли NDVI та LAI території дослідження

Далі були проведені розрахунки за алгоритмом 3.4 визначення якості рослинності. Результати розрахунку RET та VQF показані на рис. 4.21.



а б

Рис.4.21. Просторові розподіли RET (а) та нормованої кількості рослинності VQF (б) території дослідження

Потім за формулою (3.3) було обчислено інтегральний показник стану рослинності, просторовий розподіл якого представлений на рис.4.22.

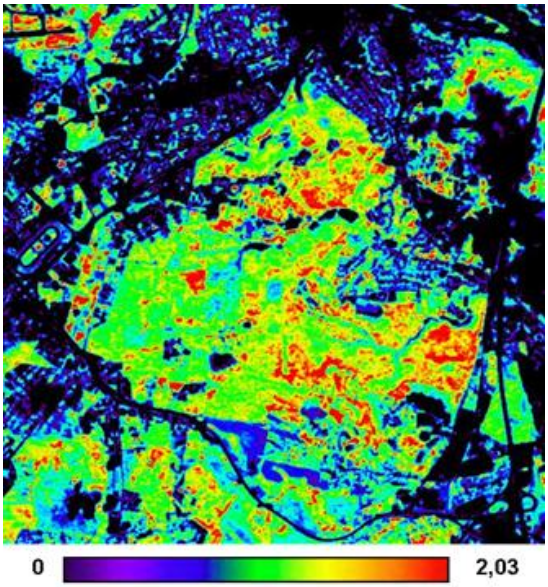


Рис.4.22. Просторовий розподіл інтегрального стану рослинності території дослідження

В результаті обробки зображення для Голосіївського лісопарку отримано такі кількісні показники стану рослинності: загальна площа зелених насаджень 1661,70 га, повна площа з урахуванням LAI 1730,72 га, інтегральна площа з урахуванням LAI та якісного стану рослинності 1387,44 га.

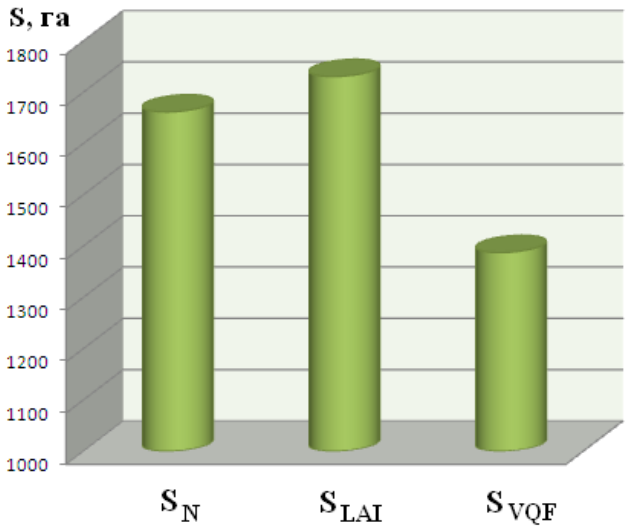


Рис. 4.23. S_N – площа проективного покриття рослинності; S_{LAI} – площа рослинності з урахуванням LAI; S_{VQF} – площа рослинності з урахуванням якості рослинності

Перевищення площі зелених насаджень з урахуванням LAI пояснюється домінуванням деревної рослинності з LAI більше одиниці на території лісопарку. Але врахування якісного стану рослинності, який відображає вплив фенологічної фази жовтіння листя, призводить до дефіциту інтегральної площі, що свідчить про потенційну можливість завищення кількості зелених насаджень (фотосинтетично активної фітомаси) при застосуванні нормативної методики підрахунків.

4.2 Оцінка довготривалих змін рослинності київської міської агломерації

В рамках дослідження були проаналізовані багатоспектральні знімки Київської агломерації, отримані супутниковою системою Landsat (сенсори TM та ETM+) з 1992 по 2011 роки. Більше 40 з них (рис.4.24), що задовольняють

умови вибору знімків (пункт 2.1.1) були отобрані для подальшого аналізу. Всі вони знаходяться в межах вегетаційнного періоду більшості видів рослин, представлених в агломерації.

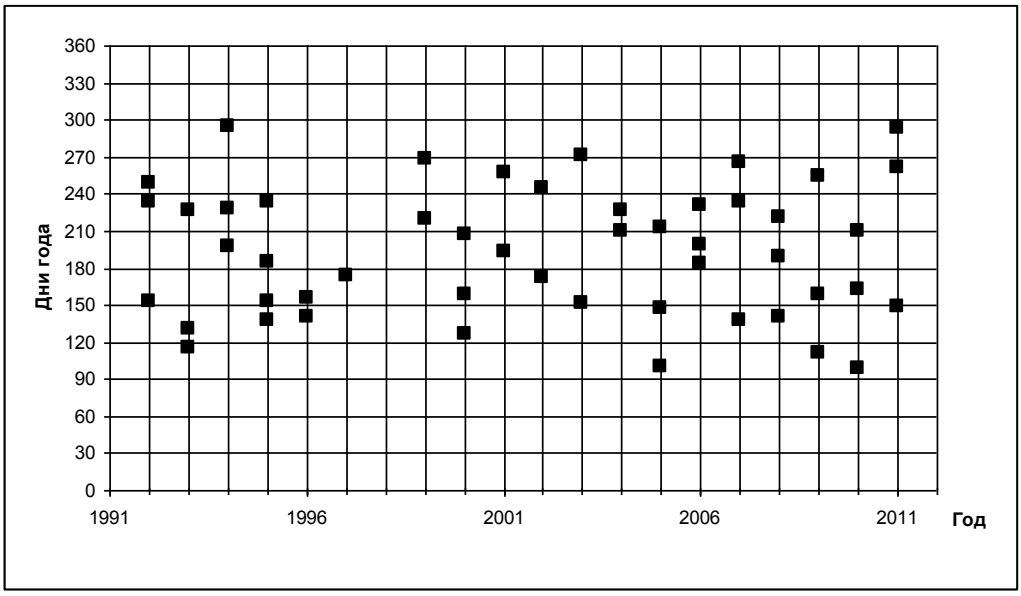


Рис.4.24. Розподіл відібраних для аналізу космічних знімків

Очевидно, що по нерегулярної і досить рідкій сітці спостережень неможливо достовірно виокремити короткоперіодичні – внутрішньорічні, сезонні – складові часового ряду, тому в роботі основна увага приділялася аналізу довготривалих трендів (десятки років) та періодик (одиниці років) динаміки рослинності. Обробка нерегулярних часових рядів розподілів *LAI* проводилася за допомогою спектрального аналізу за методом максимальної ентропії [145]. Необхідні для цього обчислювальні процедури – mese(), maximum entropy spectral estimation і detrend() – реалізовані в модулі Signal Processing Toolbox вільно поширюваного математичного програмного пакету з відкритим вихідним кодом SciLab [152].

Методами, описаними в пунктах 2.1.2 та 2.1.3, для приведення в єдину систему фізичних показників результатів зйомки були виконані радіометричне калібрування, а також атмосферна корекція. Для усунення ділянок, які займають хмари, використовувався програмний модуль ACCA (рис.4.25) [98]. Знімки були взаємно георефренціровані з піксельною точністю та обрізані.

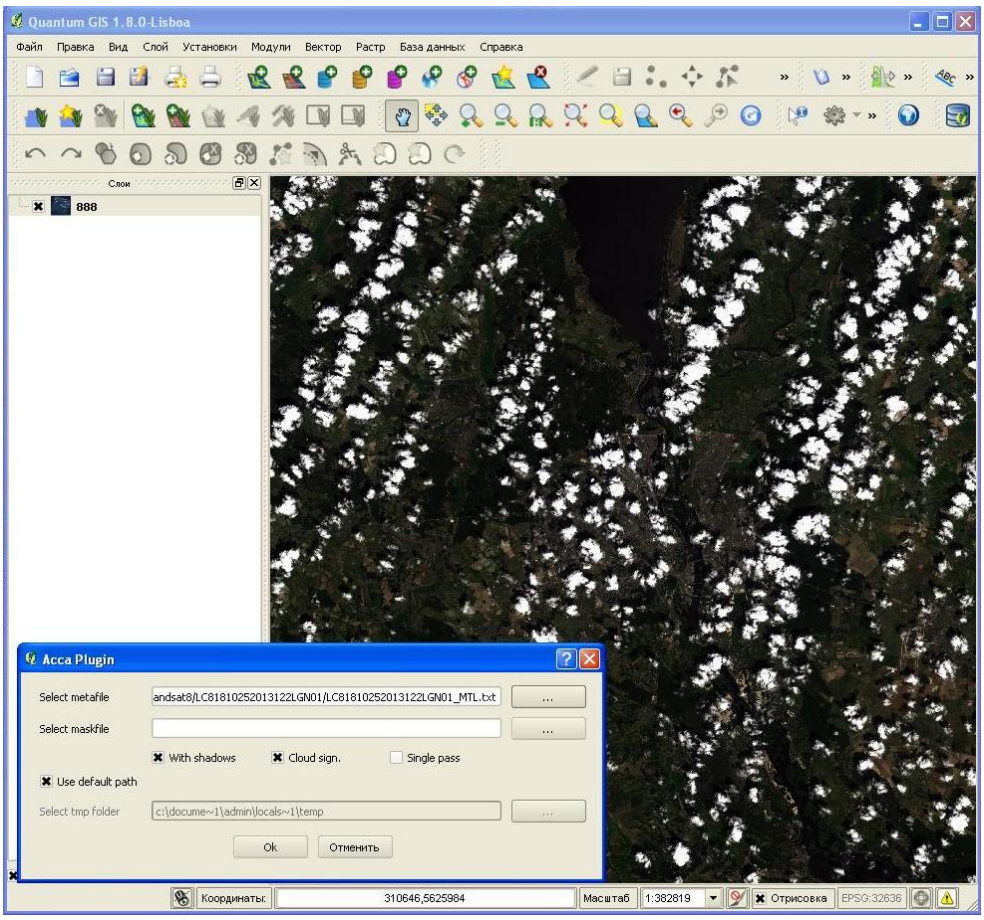


Рис. 4.25. Використання модуля ACCA для усунення хмарності

Для аналізу рослинності та відділення від неї інших природних і штучних об’єктів використовувався просторовий розподіл NDVI.

За спеціально синтезованим для кожного знімка (в результаті інтерактивного аналізу території) пороговим вирішальним правилом просторові розподіли NDVI були розділені на 2 класи: “рослинність” (Vegetation) і “не рослинність” (Non-Vegetation). Дерево рішень показано на рис.4.26.

$$\boldsymbol{NDVI \geq 0.258427}$$

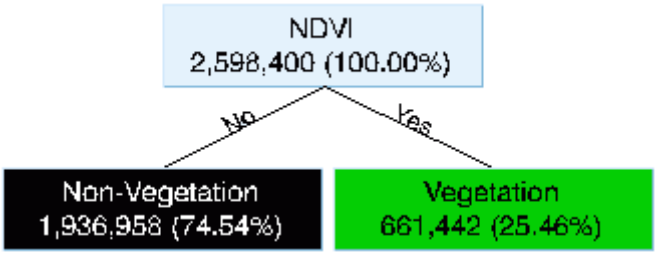


Рис.4.26. Дерево рішень класифікації просторового розподілу NDVI

Порядок розрахунку індексу LAI території досліджень для одного космічного знімку за алгоритмом 3.1 ілюструється на рис.4.27.

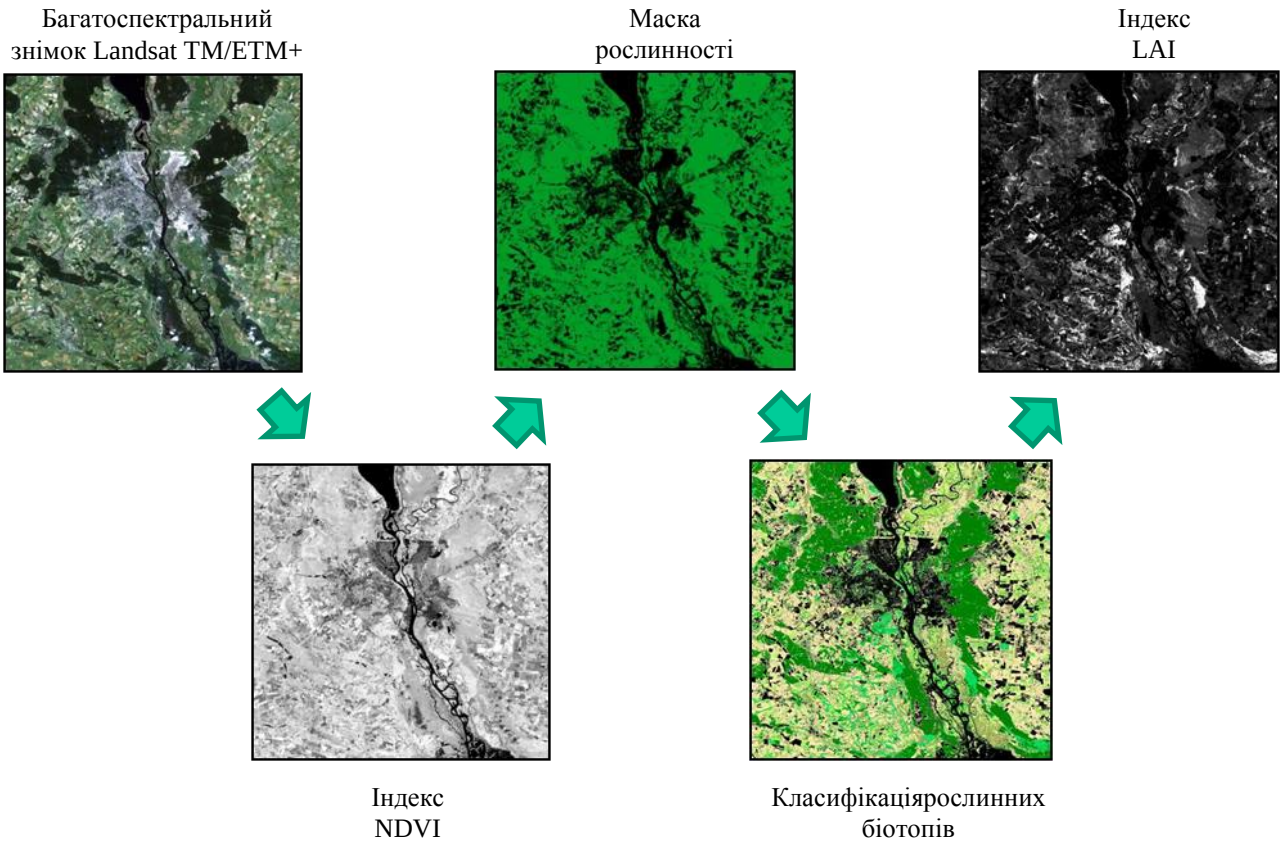


Рис. 4.27. Порядок визначення індексу листкової поверхні території дослідження

Описана операція послідовно застосовувалася до всіх відібраних космічних знімків, в результаті чого був сформований довготривалий часовий ряд просторового розподілу *LAI* території дослідження для подальшого аналізу.

Для аналізу часових рядів дистанційних даних методами, описаними в підрозділі 2.4 та за алгоритмом 3.7, розроблено розрахунковий скрипт в обчислювальному середовищі SciLab [153]. Реалізація в ньому аналізу часових рядів дає можливість використання не строго періодичних знімків, характерних саме для дистанційних даних внаслідок впливу погодних явищ, в першу чергу хмарності.

Результати аналізу часового ряду LAI представлені у вигляді просторових розподілів і виражають середнє значення за період спостережень,

середньорічний приріст (рис. 4.27), а також періодичні складові динаміки рослинного покриву [19].

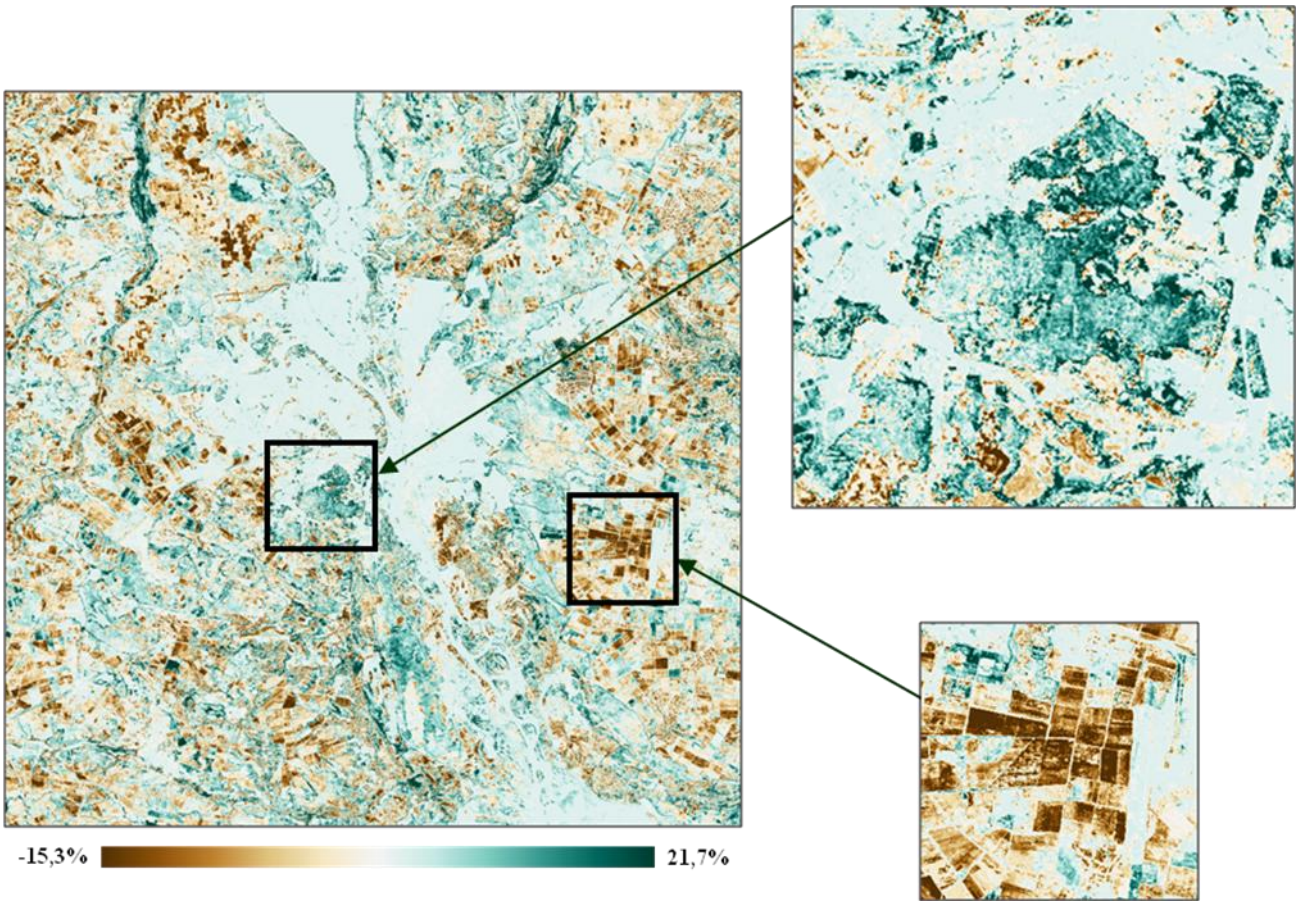


Рис. 4.27. Середньорічний приріст LAI території дослідження

Усереднені по всій території Київської агломерації показники склали: середнє значення 0,2986, середньорічний приріст -0,3125%, річна періодична компонента 3,5518 ‰, найбільш значна періодична компонента 43,4 місяці [18].

Дослідження проводилося по всій території агломерації, в якій рослинний покрив займає не більше 40% загальної площі, решта - акваторії, селитебні і промислові території (включаючи транспортну систему) з нульовим значенням LAI. Це обумовлює низьке загальне середнє значення LAI для агломерації. Для основних класів рослинних біотопів отримані середні значення LAI (табл.4.2) відповідають нормальним величинам для помірної кліматичної зони з урахуванням техногенного впливу мегаполісу.

Таблиця 4.2

Спостережувані довготривалі середні значення LAI основних рослинних біотопів території дослідження

Клас рослинних біотопів	Среднє значення LAI
Листяні	1,0912
Хвойні	0,6122
Сільськогосподарські угіддя	0,7309
Луки і пасовища	0,5451

Негативний щорічний приріст кількості рослинності пов'язаний не тільки зі зменшенням її загальної площі, яке зумовлене забудовою територій, але і з недостатньо екологічно обгрунтованими підходами до ведення лісового і міського господарства: суцільною вирубкою та вирощуванням найбільш продуктивних порід, вилученням опалого листя, щорічним посипанням тротуарів сіллю в зимовий період, тощо.

Аналіз періодичних сезонних змін дозволяє відрізняти вічнозелені рослини від листопадних, що є додатковою ефективною класифікаційною ознакою [154].

Агроекосистеми (орні землі, городи, домашні сади та ін.), які потрапляють в ареал мегаполісу, через особливий режиму використання не вписуються в загальну картину зміни рослинності, тому при оцінюванні саме урбанізованих територій їх доцільно виключати з аналізу.

Отже, за довготривалими часовими серіями багатоспектрльних космічних знімків Landsat TM/ETM+ були досліджені просторово-часові тенденції зміни рослинного покриву Київської агломерації, виділені основні тренди та періодичні компоненти.

4.3 Оцінка точності визначення параметрів рослинності за розробленою методикою

Виконувалась узагальнена оцінка точності шляхом порівняння класів рекреаційної дигресії виділів за наземними задвірковими даними з дистанційно отриманими величинами нормованого показника якості рослинності VQF, продискретизованого на відповідні уніфіковані класи ландшафтної оцінки. Кількісні результати порівняння наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Загальна узгодженість показників якості рослинності за наземними та дистанційними даними по виділах

Доля узгоджених виділів, %	Розбіжність, %
52,2	0
42,4	20
4,6	40
0,5	60
0,3	80

Усереднена за усіма виділами точність оцінки якості рослинних угруповань становить 89,14%, що є цілком задовільним для дистанційного визначення якості рослинності на міських територіях.

Точність регресійної залежності LAI(NDVI) оцінювалась коефіцієнтом детермінації R^2 та середньоквадратичною похибкою (RMSE):

Регресія методом оптимальної сплайн-інтерполяції – коефіцієнт детермінації $R^2 = 0{,}9435$ при RMSE = 0,1050; лінійна регресія – коефіцієнт детермінації $R^2 = 0{,}8234$, RMSE = 0,1908; логарифмічна регресія – коефіцієнт детермінації $R^2 = 0{,}8745$, RMSE = 0,1609. Отже, для проведення досліджень стану рослинності рекомендується регресія за методом сплайн-інтерполяції.

4.4 Розробка рекомендацій щодо впровадження розробленої методики

Порівняння стану рослинності протягом декількох років та визначення динаміки її змін із застосуванням дистанційних даних та сучасних геоінформаційних технологій є дуже корисним та ефективним інструментом для планування робіт з озеленення та догляду за рослинністю у місті.

Користуватися розробленою загальною методикою автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій, а також окремими її частинами для виконання статті 28 Закону України “Про благоустрій населених пунктів” та згідно з “Правилами утримання зелених насаджень у населених пунктах України” зможуть наступні відомства та установи:

- місцеві органи виконавчої влади та органи місцевого самоврядування;
- балансоутримувачі об’єктів благоустрою зеленого господарства державної та комунальної власності, визначені на конкурсних засадах із числа спеціалізованих підприємств органами державної влади та місцевого самоврядування;
- підприємства, власники чи користувачі земельних ділянок, на яких розміщені зелені насадження.

Для впровадження розробленої методики в практику необхідне виконання наступних додаткових завдань:

1. Розробка програмного забезпечення за принципом роботи веб-сервісів, при якому постачальник розробляє веб-застосунок (користувацька комп’ютерна програма, що дає змогу вирішувати конкретні прикладні задачі з оцінювання рослинності та планування робіт), розміщує його та управляє ним з метою та можливістю використання замовниками через інтернет за стандартними протоколами обміну TCP/IP.

Веб-застосунок – розподілений застосунок, в якому клієнтом виступає браузер, а сервером – веб-сервер. При цьому тонким клієнтом сервісу виступає звичайний веб-браузер. Логіка обробки зосереджується на сервері, а функція браузера полягає переважно у оформленні та передачі запитів користувача і відображенні інформації, завантаженої з сервера після обробки. Однією з

переваг такого підходу є той факт, що клієнти не залежать від конкретного операційного середовища користувача, тому веб-застосунки є міжплатформовими сервісами.

Для більшої інтерактивності і продуктивності розроблюваних веб-застосунків пропонується використовувати технологію AJAX, яка нині де-факто є стандартом розробки веб-сервісів.

2. Налаштувати регулярний доступ до знімків з певними частотами, що залежать від вирішуваних задач та поточної фенологічної фази рослинності (табл.2.6).

При вирішені задач на локальних ділянках невеликої площі в межах одного парку чи кварталу урбанізованої території доцільно використовувати космічні знімки надвисокої та високої просторової розрізненості, наприклад, Pléiades-1A та Kompsat-3.

Для дослідження території міських районів, а також змін за невеликий проміжок часу (напротязі року або декількох) необхідні космічні знімки середньої просторової розрізненності, такі як RapidEye та Січ-2.

Знімки середньої просторової розрізненості Landsat стануть зручним інструментом для дослідження змін стану рослинності значних територій (великих міст та міських агломерацій) на протязі тривалих проміжків часу (десятки років) завдяки стабільності поставки, вивіреній методиці калібрування та корекції, великої бази архівних даних та вільного доступу.

Автоматизована підсистема оцінювання стану рослинності урбанізованих територій має бути інтероперабельною з існуючими і перспективними ГІС управління урбанізованими територіями та сумісною з ними по даних і протоколах обміну.

3. Для забезпечення працездатності та прийнятної продуктивності автоматизованої підсистеми оцінювання стану рослинності урбанізованих територій очікуються такі орієнтовні вимоги до апаратного забезпечення:

Сервер:

- сервер на базі багатопроцесорної архітектури чи обчислювальний кластер;

- не менш 16 Гб оперативної пам’яті;
- вільний об’єм на жорсткому диску має в декілька разів має перевищувати об’єм знімків, що використовуються;

Клієнт:

- графічна робоча станція на базі 2-4-ядерного процесору;
- не менш 4 Гб оперативної пам’яті;

Мережева підсистема:

- оптоволоконне чи провідне середовище передачи даних зі швидкістю не менш 1 Гбіт/с.

Запропонована методика є досить гнучкою і універсальною, її може бути порівняно легко адаптовано для застосування не тільки для урбанізованих територій, але і для інших природних рослинних угруповань, таких, як об’єкти лісового фонду, заповідники, заказники і біорезервати, лісозахісні та стабілізаційні насадження. Особливо ефективною розроблена методика може бути для оцінювання стану рослинності територій з обмеженим доступом, таких як військові полігони, зони відчуження внаслідок стихійних лих чи техногених катастроф.

Розроблену методику комплексного автоматизованого оцінювання стану рослинності з використанням космічних знімків було *впроваджено* в ДП «Дніпропетровське лісове господарство». Алгоритми дистанційного оцінювання якості рослинності на основі апроксимації спектрального відбиття в області червоного краю були використані при оцінюванні екологічного стану, здійсненні моніторингу лісів Дніпропетровщини та при плануванні науково-дослідної роботи “Екологічний та енергетичний потенціал головних лісотвірних порід Степового Придніпров’я України”.

Наукові положення та результати дисертаційного дослідження, а саме оцінювання якісного стану рослинності за багатоспектральними супутниковими знімками та наземними завірковими даними, алгоритми оцінки кількості рослинності урбанізованих територій на основі побудови робастної регресії та використанні індексу листової поверхні були апробовані та використовуються

науковим та рекреаційним відділами Національного природного парку «Голосіївський» при оцінюванні загального екологічного стану території, стану рослинності, моніторингу змін екосистем під впливом рекреаційних навантажень та впроваджуються у наукову діяльність НПП «Голосіївський».

Висновки до четвертого розділу

1. Розроблену методику автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій перевірено на 49 тестових точках на території НПП “Голосіївський” та “Біличанського лісу” КП “Святошинське ЛПГ” в період з 2012 по 2014 рр. за результатами обробки багатоспектральних космічних знімків Landsat/TM, ETM+, Landsat/OLI, RapidEye/JSS, “Січ-2”/МСУ, Pléiades-1A/VHR.

2. Вперше отримано регресійні залежності LAI(NDVI), VQF(RET) для території Києва та Київської агломерації з коефіцієнтами детермінації від 0,81 до 0,96, що робить можливим їх практичне застосування.

3. Виявлено розходження результатів дистанційного зондування з проектними даними офіційної статистики ДП “Київзеленбуд” по 3-ох районах Києва в межах 16%.

4. Виявлено довготривалі зміни кількості рослинності київської міської агломерації з середньою прогнозованою швидкістю -0,3% на рік. Від'ємний щорічний приріст кількості рослинності пов’язаний не тільки зі зменшенням її загальної площі, зумовленого забудовою території, але й з недостатньо екологічно обґрунтованими підходами до ведення лісового та міського господарства.

5. Розроблено рекомендації, які можуть бути опрацьовані організаціями по захисту навколишнього середовища та розвитку зелених насаджень міста, а також міськими державними адміністраціями для прийняття управлінських рішень. Розроблену методику впроваджено в Національному природному парку «Голосіївський» та в ДП «Дніпропетровське лісове господарство».

ВИСНОВКИ

У дисертації подано теоретичне узагальнення і запропоновано нове вирішення наукової задачі, що полягала у розробці комплексної геоінформаційної методики об’єктивного кількісного оцінювання поточного стану рослинності урбанізованих територій на основі даних багатоспектрального космічного знімання для підвищення його оперативності, інформативності та об’єктивності. Цю задачу було розв’язано, мету дослідження досягнуто.

Основні результати дисертації дозволяють зробити такі висновки:

1. Проведений аналіз сучасних наземних методів оцінки стану рослинності урбанізованих територій. Виявлено, що вони досить трудомісткі, недостатньо оперативні, не враховують загальної кількості та якості рослинності.

2. Проведений аналіз сучасних дистанційних методів оцінки стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних та гіперспектральних даних. Обґрунтовано принципову можливість застосування багатоспектральних супутникових даних для підвищення інформативності та оперативності оцінювання інтегрального стану рослинності урбанізованих територій.

3. Визначено завдання дослідження та сформована загальна схема проведення дослідження, яка включає в себе проміжні методики визначення кількісних та якісних показників рослинності, аналізу довготривалих часових серій багатоспектральних космічних знімків та комплекс польових завіркових досліджень.

4. Розглянуті методи попередньої обробки космічних знімків, потрібні для розв’язання задач оцінювання стану рослинності урбанізованих територій. Особливу увагу приділено радіометричному калібруванню сенсорів супутникової системи “Січ-2” з використанням даних польових спектрометричних вимірювань.

5. Обґрунтовано основні показники, що визначають стан рослинності урбанізованих територій і будуть використовуватися при його оцінюванні за багатоспектральними космічними знімками: для кількості рослинності – індекс листкової поверхні LAI, для якості рослинності – величина екстремуму похідної спектрального відбиття в зоні червоного краю 0,68-0,73 мкм – RET.

6. Розроблено теоретичне підґрунтя застосованих методів оцінювання стану рослинності за багатоспектральними космічними знімками – побудова робастної регресії, оптимальна сплайн-інтерполяція та аналіз трендів просторово-часових змін рослинності.

7. Розроблено алгоритми оцінки кількості та якості рослинності урбанізованих територій, а також алгоритм виявлення просторово-часових тенденцій змін рослинного покриву з використанням довготривалих часових серій багатоспектральних космічних знімків.

8. Розроблено комплексну методику автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків, яка поєднує в собі всі розроблені вище проміжні методики та алгоритми.

9. Розроблену методику автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій перевірено на 49 тестових точках на території НПП “Голосіївський” та “Біличанський ліс” КП “Святошинське ЛПГ” в період з 2012 по 2014 рр. за результатами обробки багатоспектральних космічних знімків Landsat/TM, ETM+, Landsat/OLI, RapidEye/JSS, “Січ-2”/МСУ, Pléiades-1/VHR.

10. Вперше отримано регресійні залежності NDVI від LAI, VQF від RET для території Києва та Київської агломерації з коефіцієнтами детермінації від 0,81 до 0,96, що робить можливим їх практичне застосування.

11. Виявлено довготривалі зміни кількості рослинності київської міської агломерації з середньою прогнозованою швидкістю -0,3% на рік. Від’ємний щорічний приріст кількості рослинності пов’язаний не тільки зі зменшенням її загальної площі, зумовленим забудовою території, але й з недостатньо

екологічно обґрунтованими підходами до ведення лісового та міського господарства.

12. Розроблено рекомендації, які можуть бути опрацьовані організаціями по захисту навколишнього середовища та розвитку зелених насаджень міста, а також міськими державними адміністраціями для прийняття управлінських рішень. Розроблену методику впроваджено в Національному природному парку “Голосіївський” та в ДП “Дніпропетровське лісове господарство”, що підтверджується відповідними актом та довідкою.

Запропонована методика є досить гнучкою і універсальною, вона може бути порівняно легко адаптована для застосування не тільки для урбанізованих територій, але і для інших природних рослинних угруповань, таких, як об’єкти лісового фонду, заповідники, заказники і біорезервати, лісозахисні та стабілізаційні насадження. Особливо ефективною розроблена методика може бути для оцінювання стану рослинності територій з обмеженим доступом, таких як військові полігони, зони відчуження внаслідок стихійних лих чи техногенних катастроф.

Отже, на основі проведених досліджень розроблено методику комплексного автоматизованого оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням космічних знімків, яка відрізняється від існуючих новим фізично обґрунтованим інтегральним кількісним показником стану рослинності.

Перспектива подальших досліджень вбачається в удосконаленні моделей та визначенні зв’язку з кількісними біофізичними параметрами рослинності, такими як кількісні параметри газообміну, продуктивність, поглинальна здатність. Також є потреба в проведенні додаткових польових досліджень в різних ландшафтно-кліматичних зонах України для відновлення відповідних регресійних залежностей. Одним з можливих шляхів вдосконалення запропонованої методики може бути підвищення спектральної розрізненності існуючих багатоспектральних зображень шляхом використання технічного

рішення, описаного в додатку В. Новизна даного технічного рішення підтверджена патентом України на винахід № 109210.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Miller R. W. Urban forestry: Planning and managing urban greenspaces / R. W. Miller. – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988. – 404 pp.

2. Pillmann W., Kellner K. Monitoring of green urban spaces and sealed surface areas / W. Pillmann, K. Kellner // Proceedings of the 2nd International Symposium “Remote Sensing of Urban Areas”. – Regensburg: University of Regensburg, 2001. – CD.

3. Newman A. P. Monitoring urban forest canopy cover using satellite imagery / A. P. Newman // Environmental Monitoring and Assessment, 1993. – Vol. 26. – No. 2-3. – P. 175–176.

4. Корец М. А. Оценка состояния растительного покрова в зоне воздействия промышленных предприятий с использованием данных ENVISAT-MERIS и SPOT-Vegetation / М. А. Корец, В. А. Рыжкова, С. А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2006. – Т. 2. – № 3. – С. 330–334.

5. Кочубей С.М. Использование деривативных вегетационных индексов для оценки содержания хлорофилла в растительности по данным измерения из космоса / С. М. Кочубей, Т. А. Казанцев // Космічна наука і технологія, 2011. – Т. 17. – № 3. – С. 54–59.

6. Кохан С. С. Аналіз земельних ресурсів за кількісними та якісними характеристиками їх екологічного стану (на прикладі Київської області) / С. С. Кохан, А. А. Москаленко // Вісник геодезії та картографії, 2012. – № 4. – С. 26–32.

7. Лялько В. І. Застосування матеріалів багатоспектральної космічної зйомки при вирішенні задач природокористування / В. І. Лялько, М. О. Попов, О. Д. Федоровський, А. І. Воробйов, Г. М. Жолобак, З. В. Козлов, А. Г. Мичак, О. І. Сахацький, С. А. Станкевич, В. Є. Філіпович, З. М. Шпортюк // Космічні дослідження в Україні 2004-2006. – К.: НКАУ, 2006. – С. 14–21.

8. Изменение земных систем в Восточной Европе / Отв. ред. В. И. Лялько.– Киев, 2010. – 582 с.

9. Попов М. О. До оперативного оцінювання забезпеченості міських територій зеленими насадженнями із застосуванням багатоспектральних аерокосмічних знімків / М. О. Попов, С. А. Станкевич, А. О. Козлова, І. О. Маркова // Науковий вісник Національного аграрного університету. – Вип.128. – Київ: НАУУ, 2008. – С. 299–301.

10. Станкевич С. А. Картирование изменений растительного покрова Киевской агломерации на основе долговременных временных рядов многоспектральных космических снимков Landsat / С. А. Станкевич, И. А. Пестова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – Институт космических исследований РАН. – Москва, 2014. – Т. 11. № 2. – С. 187–196.

11. Станкевич С. А. Геоінформаційний сервіс оброблення даних для оцінювання рослинності урбанізованих територій / С. А. Станкевич, І. О. Пєстова // Вісник геодезії та картографії, 2014. – № 3. – С. 23–26.

12. Станкевич С. А. Дистанційна оцінка якісного стану рослинності на міських територіях на прикладі НПП «Голосіївський» [Електронний ресурс] / С. А. Станкевич, І. О. Пєстова, О. О. Година, Р. С. Філозоф // Електронний журнал «Наукові доповіді НУБіП України». – 2015-2(51). 12 с. – Режим доступу до журн.: http://nd.nubip.edu.ua/2015_2/5.pdf

13. Piestova I. Quantitative vegetation mapping of urban area using high-resolution multispectral satellite imagery / I. Piestova // “Science-Based Technologies”, 2015. – Vol. 2. – No. 26. – P. 153–158.

14. Спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень за допомогою сканування спектральним вікном [Текст] : ПАТЕНТ № 109210 / Попов М. О., Станкевич С. А., Козлова А. О., Пєстова І. О., Лубський М. С.; власник патенту ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України”. – № а 2014 01471; заявл. 14.02.2014; опубл. 25.07.15, Бюл. № 14 – 7 с.

15. Пєстова І. О. Виявлення довготривалих трендів стану рослинності урбанізованих територій / І. О. Пєстова // Екологічна безпека держави: тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів, (НАУ, Київ, 16–18 квітня 2013). – К.: НАУ, 2013. – 260 с.

16. Пестова И. А. Возможность глобального количественного картирования растительности Земли на основе спутниковых информационных продуктов / И. А. Пестова // Астрономічна школа молодих вчених матеріали міжнародної наукової конференції, (Біла Церква, Україна, 15–17 травня 2013). – К.: Наукова думка, 2013. – С. 44–46.

17. Станкевич С. А. Дистанційне оцінювання кількості рослинності в міських агломераціях / С. А. Станкевич, І. О. Пєстова // Матеріали науково-практичної конференції «Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій» (м.Київ, Україна, 10-13 червня 2013).– К.: ІНТ НАУ, 2013. – С. 75–80.

18. Станкевич С. А. Долговременные ряды спутниковых изображений как инструмент анализа количественных изменений растительного покрова / С. А. Станкевич, И. А. Пестова // Збірник тез 13-ї Української конференції з космічних досліджень (2-6 вересня 2013р., Євпаторія). – К.: Видавництво «Кафедра», 2013. – С. 170.

19. Пестова И. А. Анализ долговременных трендов изменения растительного покрова Киевской агломерации с использованием многоспектральных космических снимков среднего пространственного разрешения / И. А. Пестова, С. А. Станкевич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сборник материалов Одиннадцатой Всероссийской открытой конференции (ИКИ, Москва, РФ, 11–15 ноября 2013). – М.: ИКИ, 2013. – С. 347.

20. Stankevich S.A. Vegetation state quantitative estimation within urban area / S.A. Stankevich, I.A. Piestova // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: матеріали доповідей четвертої міжнародної

конференція (Київ, Україна, 26–30 травня 2014). – К.: Наукова думка, 2014. – С. 90–93.

21. Пєстова І. О. Глобальне картування якісного стану рослинності на основі супутникових інформаційних продуктів NOAA/AVHRR / І. О. Пєстова // Астрономічна школа молодих вчених матеріали міжнародної наукової конференції, (Кіровоград, Україна, 29–31 травня 2014). – К.: Наукова думка 2014. – С. 50–51.

22. Пєстова І. О. Оцінювання стану рослинності в міських агломераціях на основі супутникових знімків "Січ-2" та RapidEye / І. О. Пєстова, С. А. Станкевич, М. С. Лубський // Збірник тез 14-ї Української конференції з космічних досліджень (8-12 вересня 2014р., Ужгород). – К.: Видавництво «Кафедра», 2014. – С. 151.

23. Станкевич С .А. Определение индекса листовой поверхности (LAI) по данным дистанционного зондирования и наземной полевой заверки / С. А. Станкевич, И. А. Пестова, Н. С. Лубский, И. А. Ющенко // Сборник тезисов двенадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (10-14 ноября 2014г., Москва), 2014. – CD.

24. Пєстова І. О. Оцінка якісного стану рослинності на міських територіях з використанням космічних знімків та даних наземної польової завірки на прикладі НПП «Голосіївський» / І. О. Пєстова, С. А. Станкевич, О. О. Година, Р. С. Філозоф // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграція геопросторових даних у дослідженнях природних ресурсів» (27-28 листопада 2014 р.) – К.: Компринт, 2014. – С. 32–34.

25. Piestova I. Global spatio-temporal vegetation mapping with remote sensing satellite data products / I. Piestova // Астрономічна школа молодих вчених: матеріали міжнародної наукової конференції, (Житомир, Україна, 20–22 травня 2015). – К.: Наукова думка, 2015. – С. 98–99.

26. Piestova I. Geoinformation technology for urban vegetation assessment using multispectral remote sensing / I. Piestova // Abstracts of 15th Ukrainian

Conference for Space Research. – Chernomorka: Odessa I.I. Mechnikov National University, 2015. – P. 206.

27. Radakovich J. D. Results from global land-surface data assimilation methods / J. D. Radakovich, P. R. Houser, A. da Silva, M. G. Bosilovich // American Meteorological Society, 2001. – P. 132–134.

28. Низкий С. Е. особенности формирования фитоценозов селитебной территории на примере города Благовещенска / С. Е. Низкий. – Благовещенск: изд-во ДальГАУ, 2011. – 106 с.

29. Roe P. A. Priorities for revegetating landscapes disturbed by mining and other activities / P. A. Roe // Tropical Grasslands, 1997. – Vol. 31. – No. 4. – P. 282–284.

30. Fancy S. G. Monitoring the condition of natural resources in US national parks / S. G. Fancy, J. E. Gross, S. L. Carter // Environmental Monitoring and Assessment, 2009. – Vol. 151. – No. 1-4. – P. 161–174.

31. Cui J. Underground pedestrian systems development in cities: Influencing factors and implications / J. Cui, A. Allan, M. A. P. Taylor, D. Lin // Tunnelling and Underground Space Technology, 2013. – Vol. 4. – No. 35. – P. 152–160.

32. Строчинський А. А. Таксація зелених насаджень на території міста Києва: теорія та практика. Монографія / А. А. Строчинський, В. В. Миронюк. – Корсунь-Шевченківський: ФОП Гавришенко, 2013. – 179 с.

33. Закон України „Про благоустрій населених пунктів” // Відомості Верховної Ради України, 2005. – № 49. – Ст. 517.

34. Методичні рекомендації щодо визначення максимального рекреаційного навантаження природних комплексів і об’єктів у межах природно-заповідного фонду України за зонально-регіональним розподілом / Державна служба заповідної справи Мінекоресурсів України, Науковий центр заповідної справи Мінекоресурсів України. – К., 2003. – 43 с.

35. Миклуш С. І. Ландшафтно-рекреаційні ознаки лісів лісопаркових частин зелених зон населених пунктів / С. І. Миклуш, Ю. С. Миклуш // Наукові праці Лісівничої академії наук України, 2013. – Вип. 11. – С. 51–57.

36. Гірс О. А. Лісовпорядкування : підручник [для студ. вищ. навч. закл.] / О. А. Гірс, Б. І. Новак, С. М. Кашпор. – К.: Арістей, 2004. – 384 с.

37. Каганяк Ю. Й. Парколісовпорядкування: навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / Ю. Й. Каганяк, А. А. Строчинський, М. П. Горошко. – Львів: Тріада плюс, 2009. – 360 с.

38. Репшас Е. А. Особенности дигрессии и регрессии рекреационных лесов Литовской ССР / Е. А. Репшас // Рекреационное лесопользование в СССР. – М.: Наука, 1983. – С. 44–55.

39. Миклуш Ю. С. Ландшафтно-таксаційний виділ та його характеристики / Ю. С. Миклуш // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України : зб. наук.-техн. праць, 2013. – Вип. 23.13. – С. 47–54.

40. Фізіологія рослин: практикум / О. В. Войцехівська, А. В. Капустян, О. І. Косик та ін. [За заг.ред. Т. В. Паршикової]. – Луцьк: Терен, 2010. – 420 с.

41. Chen J. M. Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by boreal conifer forests / J. M. Chen // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996. – Vol. 34. – P. 1353–1368.

42. Breada N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies / N. J. J. Breada // Journal of Experimental Botany, 2003. – Vol. 54. – No. 392. – P. 2403–2417.

43. Феклистов П. А., Особенности сосняков лесопарка «Ягры» / П. А. Феклистов, В. Н. Евдокимов, Е. В. Евдокимова, А. Л. Федяев, Д. Е. Самылов, С. И. Зубаха // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: естественные науки, 2011. – №1. – С. 89–95.

44. Hutchison B. A. The architecture of a deciduous forest canopy in eastern Tennessee, U.S.A. / B. A. Hutchison, D. R. Matt, R. T. McMillen, L. J. Gross, S. J. Tajchman, J. M. Norman // Journal of Ecology, 1986. – Vol. 74. – P. 635–646.

45. Garrigues S. Validation and intercomparison of global leaf area index products derived from remote sensing data / S. Garrigues, R. Lacaze, F. Baret,

J. T. Morisette, M. Weiss, J. E. Nickeson, R. Fernandes, S. Plummer, N. V. Shabanov, R. B. Myneni, Y. Knyazikhin, W. Yang // Journal of Geophysical Research, 2008. – Vol. 113. – G02028. – P. 1–20.

46. Попов М. О. Оцінювання характеристик зелених насаджень з використанням засобів дистанційного зондування Землі / М. О. Попов, І. Д. Семко // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. [та ін.]. – К., 2013. – Вип. 12. – С. 51–62.

47. Chen J. M. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements / J. M. Chen, P. M. Rich, S. T. Gower, J. M. Norman, S. Plummer // Journal of Geophysical Research, 1997. – Vol. 102. – No. D24. – P. 29429–29443.

48. Jonckheere I. Review of methods for in-situ leaf area index determination. Part 1. Theories, sensors and hemispherical photography / I. Jonckheere, S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Copin, M. Weiss, F. Baret // Agricultural and Forest Meteorology, 2004. – Vol. 121. – P. 19–35.

49. Leblanc S. G. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests / S. G. Leblanc, J. M. Chen, R. Fernandes, D. W. Deering, A. Conley // Agricultural and Forest Meteorology, 2005. – Vol. 129. – P. 187–207.

50. Van Gardingen P. R. Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography / P. R. Van Gardingen, G. E. Jackson, S. Hernandez-Daumas, G. Russell, L. Sharp // Agricultural and Forest Meteorology, 1999. – Vol. 94. – No. 3-4. – P. 243–257.

51. LAI-2000 plant canopy analyzer: operating manual / LI-COR Inc., Nebraska, U.S.A, 1990.

52. Loriaux S. D. Closing in on maximum yield of chlorophyll fluorescence using a single multiphase flash of sub-saturating intensity / S. D. Loriaux, T. J. Avenson, J. M. Welles, D. K. McDermitt, R. D. Eckles, B. Riensche, B. Genty // Plant, Cell & Environment, 2013. – Vol. 36. – No. 10. – P. 1755–1770.

53. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька та М. О. Попова. – К.: Наук. думка, 2006. – 360 с.

54. Zheng G. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: Theories, methods and sensors / G. Zheng, L. M. Moskal // Sensors, 2009. – Vol. 9. – P. 2719–2745.

55. Кохан С. С. Дослідження динаміки вегетаційних індексів для оцінювання стану сільськогосподарських культур на основі даних IRS-1D LISS-III / С. С. Кохан // Вісник геодезії та картографії, 2011. – № 4(73). – С. 20–24.

56. Костюченко Ю. В. Оцінка невизначеностей при визначенні продуктивності рослинного покриву та формуванні вуглецевого балансу територій за даними ДЗЗ / Ю. В. Костюченко, Д. М. Мовчан, І. Г. Артеменко, Ю. Г. Білоус // Геоінформатика, 2013. – № 3(47). – С. 67–75.

57. Dash J. The MERIS terrestrial chlorophyll index / J. Dash, P. J. Curran // International Journal of Remote Sensing, 2004. – Vol. 25. – P. 5403–5413.

58. Horler D. N. H. The red edge of plant leaf reflectance / D. N. H. Horler, M. Dockray, J. Barber // International Journal of Remote Sensing, 1983. – Vol. 4. – P. 273–288.

59. Seager S. Vegetation's red edge: a possible spectroscopic biosignature of extraterrestrial plants / S. Seager, E. L. Turner, J. Schafer, E. B. Ford // Astrobiology, 2005. – Vol. 5. – No. 3. – P. 372–390.

60. Лялько В. І. Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем / В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін, А. І. Воробйов // Космічна наука і технологія, 2010. – 16, № 6. – С. 5–10.

61. Baret F. Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands / F. Baret, S. Jacquemoud, G. Guyot, C. Leprieur // Remote Sensing Environment, 1992. – Vol. 41. – No. 2/3. – P. 133–142.

62. Buschmann C. Fernerkundung von Pflanzen / C. Buschmann // Naturwissens chaften, 1993. – 80. – S. 439–453.

63. Buschmann C. Reflexionsspektren von Blättern und nadeln als Basis für die physiologische Beurteilung von Baumschaden / C. Buschmann, E. Nagel. – PEF-Report Nr. 90. Karlsruhe: Kernforschungszentrum, 1992. – 165 s.

64. Buschmann C. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for the remote sensing of vegetation / C. Buschmann, E. Nagel // International Journal of Remote Sensing, 1993. – Vol. 14. – P. 711–722.

65. Collins W. Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits / W. Collins, S.-H. Chang, G. Raines et al. // Economic Geology, 1983. – Vol. 4. – No. 78. – P. 737–749.

66. Rock B. N. Comparison of the in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline / B. N. Rock, T. Hoshizaki, J. R. Miller // Remote Sensing Environment, 1988. – Vol. 24. – P. 109–127.

67. Лялько В. І. Зіставлення супутникових та наземних гіперспектральних даних при визначенні позиції червоного краю спектрів відбиття / В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін, В. В. Григоренко // Косм. наука і технологія, 2010. – 16, № 3. – С. 39–45.

68. Тужилкина В. В. Хлорофильный индекс в фитоценозах коренных ельников Европейского северо-востока / В. В. Тужилкина, К. С. Бобкова // Лесной журнал, 2010. – № 2. С. 17–23.

69. Цельникер Ю. Л. Хлорофильный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоями леса / Ю. Л. Цельникер, И. С. Малкина // Физиология растений, 1994. – Т. 41. – № 3. – С. 325–330.

70. Мовчан Я. И. Фитоиндикация в дистанционных исследованиях / Я. И. Мовчан, В. А. Каневский, В. Д. Семичаевский, Е. И. Левчик, А. Е. Турута // Киев: Наукова думка, 1993. – 306 с.

71. Выгодская Н. Н. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности / Н. Н. Выгодская, И .И. Горшкова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 248 с.

72. Кочубей С. Н. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики / С. Н. Кочубей, Н. И. Кобец, Т. М. Шадчина. – К.: Наукова думка, 1990. – 136 с.

73. Сахацький О. І. До можливостей оцінювання зволоженості земного покриття за багатоспектральними космічними зображеннями оптичного діапазону на прикладі території України / О. І. Сахацький, С. А. Станкевич // Доповіді НАН України, 2007. – № 11. – С. 122–128.

74. Peňuelas J. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance / J. Peňuelas, F. Baret, I. Filella // Photosynthetica, 1995. – Vol. 31. – No. 2. – P. 221–230.

75. Merzlyak M. N. Nondestructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening / M. N. Merzlyak, A. A. Gitelson, O. B. Chivkunova, V. Y. Rakitin // Physiologia Plantarum, 1999. – Vol. 106. – No. 1. – P. 135–141.

76. Apan A. Detecting sugarcane ‘orange rust’ disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery / A. Apan, A. Held, S. R. Phinn, J. Markley // International Journal of Remote Sensing, 2004. – Vol. 25. – No. 2. – P. 489–498.

77. Crist E. P. The tasseled cap de-mystified / E. P. Crist, R. J. Kauth // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1986. – Vol. 52. – No. 1. – P. 81–86.

78. Попов М. О. Технічні аспекти визначення стану рослинності урбанізованих територій з використанням дистанційних методів / М. О. Попов, С. А. Станкевич, А. О. Козлова // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки України: Перша Всеукраїнська конф. з запр. закордонних учасників: матеріали доп. – К.: Наук. думка, 2008. – С. 70–75.

79. Turner D. P. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites / D. P. Turner, W. B. Cohen, R. E. Kennedy, K. S. Fassnacht, J. M. Briggs // Remote Sensing of Environment, 1999. – Vol. 70. – P. 52–68.

80. Stenberg P. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in finnish pine and spruce stands / P. Stenberg, M. Rautiainen, T. Manninen, P. Voipio, H. Smolander // Silva Fennica, 2004. – Vol. 38. – No. 1. – P. 3–14.

81. Ganguly S. Generating global leaf area index from Landsat: algorithm formulation and demonstration / S. Ganguly, R. R. Nemani, G. Zhang, H. Hashimoto, C. Milesi, A. Michaelis, W. Wang, P. Votava, A. Samanta, F. Melton, J. L. Dungan, E. Vermote, F. Gao, Y. Knyazikhin, R. B. Myneni // Remote Sensing of Environment, 2012. – Vol. 22. – P. 185–202.

82. Huete A. Modis vegetation index (MOD13): [Електронний ресурс] / Version 3. Algorithm theoretical basis document – NASA, MODIS-WEB, 1999. – Режим доступу: http://modis.gsfc.nasa.gov.

83. Fernandes R. Evaluating image-based estimates of leaf area index in boreal conifer stands over a range of scales using high-resolution CASI imagery / R. Fernandes, J. R. Miller, J. M. Chen, I. G. Rubinstein // Remote Sensing of Environment, 2004. – Vol. 89. – P. 200–216.

84. Schlerf M. Derivation of forest leaf area index from multi- and hyperspectral remote sensing data / M. Schlerf, C. Atzberger, M. Vohland, H. Buddenbaum, S. Seeling, J. Hill // EARSeL eProceedings, 2004. – Vol. 3. – P. 405–413.

85. Tucker C. J. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data / C. J. Tucker, J. E. Pinzon, M. E. Brown, D. A. Slayback, E. W. Pak, R. Mahone, E. F. Vermote, N. El Saleous // International Journal of Remote Sensing, 2005. – Vol. 26. – No. 20. – P. 4485–4498.

86. Rodell M. The global land data assimilation system / M. Rodell, P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, D. Toll // Bulletin of the American Meteorological Society, 2004. – Vol. 85. – No. 3. – P. 381–394.

87. Verbyla D. L. Assessment of the MODIS Leaf Area Index Product (MOD15) in Alaska / D. L. Verbyla // International Journal of Remote Sensing, 2005. – Vol. 26. – No. 6. – P. 1277–1284.

88. Барталев С. А. Возможности исследований влияния изменений климата на состояние растительного покрова [Северной Евразии]: концепция проекта CLIVT / С. А. Барталев, М. Н. Жыжин, Е. А. Лупян, М. Ю. Матвеев, А. М. Матвеев, М. А. Медведева, И. Ю. Савин, В. А. Толпин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М., 2008. – Вып. 5. – Т. 2. – С. 272–278.

89. Huttich C. Indicators of Northern Eurasia's land-cover change trends from SPOT-VEGETATION time-series analysis 1998-2005 / C. Huttich, M. Herold, C. Schmullius, V. Egorov, S. A. Bartalev // International Journal of Remote Sensing, 2007. – Vol. 28. – No. 18. – P. 4199–4206.

90. Bunn A. G. Trends in satellite-observed circumpolar photosynthetic activity from 1982 to 2003: The Influence of Seasonality, Cover Type, and Vegetation Density / A. G. Bunn, S. J. Goetz // Earth Interactions, 2006. – Vol. 10. – No. 12. – 19 pp.

91. Суслов В. И. Эконометрия / В. И. Суслов, Н. М. Ибрагимов, Л. П. Талышева, А. А. Цыплаков. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. – 744 с.

92. Дідух Я. П. Основи біоіндикації / Я. П. Дідух. – К.: Наукова думка, 2012. – 344 с.

93. Jensen R. Using remote sensing and geographic information systems to study urban quality of life and urban forest amenities / R. Jensen, J. Gatrell, J. Boulton, B. Harper // Ecology and Society, 2004. – Vol. 9. – No. 5. – A. 5.

94. Teillet P. M. Image correction for radiometric effects in remote sensing / P. M. Teillet // International Journal of Remote Sensing, 1986. – Vol. 7. – No. 12. – P. 1637–1651.

95. Kim H. H. Normalization of satellite imagery / H. H. Kim, G. C. Elman // International Journal of Remote Sensing, 1990. – Vol. 11. –No. 8. – P. 1331–1347.

96. Di L. NASA standards for Earth remote sensing data / L. Di, B. Kobler // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000. – Vol.XXXIII. – Part B2. – P. 147–155.

97. Станкевич С. А. Информативность оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса: практические алгоритмы / С. А. Станкевич // Космічна наука і технологія, 2008. – Т. 14. – №2. – С. 22–27.

98. Попов М. О. Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи “Січ-2” за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати / М. О. Попов, С. А. Станкевич, Я. І. Зєлик, С. В. Шкляр, О. В. Семенів // Космічна наука і технологія, 2012. – Т. 18. – № 5. – С. 59–65.

99. Крючков А. И. Устранение влияния атмосферы и учёт топографии подстилающей поверхности при многоспектральном дистанционном зондировании Земли из космоса / А. И. Крючков // Исследование Земли из космоса, 2002. – № 05. – С. 45–49.

100. Schowengerdt R. A. Remote sensing: Models and methods for image processing. – San Diego: Academic Press, 2007. – 560 pp.

101. Попов М. А. Послестартовая калибровка многоспектральной съёмочной аппаратуры спутниковой системы “Сич-2” / М. А. Попов, С. А. Станкевич, С. В. Шкляр, Я. И. Зелык, О. В. Семенив, С. В. Чёрный, В. В. Лимаренко // Abstracts of 13th Ukrainian Conference on Space Research. – Eupatoria: Space Research Institute, 2013. – P. 196.

102. Тягур В.М. Оптичні системи космічних багатоспектральних сканерів / В. М. Тягур, М. І. Лихоліт, В. Г. Колобродов // Наукові вісті НТУУ “КПІ”, 2006. – № 6. – С. 125–132.

103. Беднов С. М. Вопросы создания объединенного метрологического центра коллективного пользования для калибровки ИК аппаратуры ДЗЗ / С. М. Беднов, Ю. М. Головин, Ф. С. Завелевич, Ю. П. Мацицкий, С. А. Огарев, А. С. Панфилов, М. Л. Самойлов, В. И. Саприцкий, Б. Б. Хлевной //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2006. – Т. 1. – № 3. – С. 163–169.

104. Панфилов А. С. Качество радиометрических данных оптической аппаратуры наблюдения Земли и построение российской системы обеспечения единства радиометрических измерений этой аппаратурой / А. С. Панфилов, А. А. Бурдакин, В. Р. Гаврилов, В. С. Иванов, А. Н. Кондратенко, В. Н. Крутиков, Е. В. Маколкин, С. П. Морозова, Г. Г. Райкунов, Б. Б. Хлевной, В. С. Чапоргин, В. И. Саприцкий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. – Т. 9. – № 2. – С. 152–159.

105. Зелык Я. И. Информационно-технологическая поддержка послестартовой калибровки оптико-электронных сенсоров наблюдения космической системы “Сич” / Я. И. Зелык // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2013. – № 5/9. – С. 27–38.

106. Балыко И. А. Решение системы линейных уравнений с избыточным числом уравнений / И. А. Балыко, С. В. Левашов, Д. В. Холодов, А. К. Балыко // Материалы Международной научно-технической конференции “Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения” (INTERMATIC-2012). – Ч.7. – М. : МИРЭА, 2012. – С. 136–138.

107. Авдеев М. А. Методические погрешности градуировки многозональных сканирующих устройств широкополосным с игналом / М. А. Авдеев, С. В. Чёрный // Системи обробки інформації, 2013. – Вип. 6(113). – С. 45–51.

108. Irish R. R. Characterization of the Landsat-7 ETM+ automated cloud-cover assessment (ACCA) algorithm / R. R. Irish, J. L. Barker, S. N. Goward, T. Arvidson // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006. – Vol. 72. – No. 10. – P. 1179–1188.

109. Lein J. K. Environmental sensing: Analytical techniques for Earth observation / J. K. Lein. – N.Y. : Speinger, 2012. – 348 p.

110. Кравцов С. Л. Обработка изображений дистанционного зондирования Земли (анализ методов) / С. Л. Кравцов. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – 256 с.

111. Асмус В. В. Кластерный анализ и классификация с обучением многоспектральных данных дистанционного зондирования Земли / В. В. Асмус, А. А. Бучнев, В. П. Пяткин // Журнал Сибирского федерального университета. Серия “Техника и технологии”, 2009. – Т. 2. – № 1. – С. 23–31.

112. Manandhar R. Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement / R. Manandhar, I. O. A .Odeh, T. Ancev // Remote Sensing, 2009. – Vol. 1. – No. 3. – P. 330–344.

113. Watson D. J. Comparative physiological studies in the growth of field crops. Variation in net assimilation rate and leaf areas between species and varieties, and within and between years / D. J. Watson // Annals of Botany, 1947. – Vol. 11. – P. 41–76.

114. Baret F. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment / F. Baret, G. Guyot // Remote Sensing Environment, 1991. – Vol. 35. – No. 2-3. – P. 161–173.

115. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования / Е. М. Четыркин. – М.: Финансы и статистика, 1979. – 286 с.

116. Енюков И. С. Методы, алгоритмы, программы многомерного статистического анализа / И. С. Енюков.– М. : Финансы и статистика, 1986. – 232 с.

117. Орлов А. И. Прикладная статистика / А. И. Орлов. – М.: Экзамен, 2004. – 656 с.

118. The History of Mathematical Tables from Sumer to Spreadsheets / M. Campbell-Kelly, M. Croarken, E. Robson (Eds). – N.Y.: Oxford University Press, 2003.– 372 p.

119. Carlson T.N. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index / T. N. Carlson, D .A. Ripley // Remote Sensing of Environment, 1997. – Vol. 62. – No. 3. – P. 241–252.

120. Шумейко А. А. О построении асимптотически оптимальной кусочно-линейной регрессии / А. А. Шумейко, Е. А. Шумейко // Інформатика та математичні методи в моделюванні, 2011. – Т. 1. – № 2. – С. 99–106.

121. Лигун А. А. Асимптотические методы восстановления кривых / А. А. Лигун, А. А. Шумейко. – К.: Институт математики НАН Украины, 1997. – 358 с.

122. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам / Карл де Бор. – М.: Радио и связь, 1985. – 303 с.

123. Згуровский М. З., Павлов А. А. Принятие решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами: Монография.– К.: Наукова думка, 2010. – 573 с.

124. Павлов А. А. Построение одномерной нелинейной регрессии на основе сплайн-технологии и нормированных ортогональных полиномов Форсайта / А. А. Павлов, В. В. Калашник, А. Ю. Халимон // Вісник НТУУ “КПІ”. Інформатика, управління та обчислювальна техніка, 2012. – № 55. – С. 141–143.

125. Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs / Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, Canada; Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, N.Y., USA, 1999. – 36 p.

126. Bonhomme R. The use of hemispherical photographs for determining the leaf area index of young crops / R. Bonhomme, C. Varlet Granger, P. Chartier // Photosynthetica, 1974. – Vol. 8. – P. 299–301.

127. Chen J. M. Plant canopy gap size analysis theory for improving optical measurements of leaf area index / J. M. Chen, J. Cihlar // Applied Optics, 1995. – Vol. 34. – No. 27. – P. 6211–6222.

128. Neumann H. H. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall / H. H. Neumann, G. D. Den Hartog, R. H. Shaw // Agricultural and Forest Meteorology, 1989. – Vol. 45. – P. 325–345.

129. Domaç A. Integration of environmental variables with satellite images in regional scale vegetation classification / A. Domaç, M. L. Süzen // International Journal of Remote Sensing, 2006. – Vol. 27. – No. 7. – P. 1329–1350.

130. Landgrebe D. A. Information extraction principles and methods for multispectral and hyperspectral image data / D. A. Landgrebe // Information Processing for Remote Sensing. – Hackensack: World Scientific Publishing, 2000. – P. 3–38.

131. Хандрига П. А. Информационно-статистический метод оценивания содержания биохимических компонентов в растительности / П. А. Хандрига, В. А. Яценко // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2006. – № 1. – С. 119–132.

132. Алберг Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Дж. Алберг, Э. Нильсон, Дж. Уолш; пер. с англ.– М.: Мир, 1972. – 320 с.

133. Графский О. А. Моделирование сплайнов / О. А. Графский. – Хабаровск: ДВГУПС, 2010. – 76 с.

134. Бакиров Н. К. Асимптотически оптимальный кубический сплайн / Н. К. Бакиров // Известия вузов. Математика, 2011. – № 4. – С. 8–14.

135. Автухович И. Е. Влияние городской среды на состояние зеленых насаждений / И. Е. Автухович // Материалы 2-ой экологической конференции, посвященной Всемирному дню охраны окружающей среды. М.: Изд-во МГУ, 1998. – С. 116–117.

136. Бортитц С. Влияние загрязнений воздуха на растительность. Причины, воздействие, ответ-ные меры / С. Бортитц, Х. Г. Деслер, Х. Эндерляйн и др. // Л.: Лесная промышленность, 1981. – 181 с.

137. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды / Р. Гудериан ; под ред. Г. М. Илькуна. – М., 1979. – 200 с.

138. Илькун Г. М. Газоустойчивость растений / Г. М. Илькун. – Киев: Наукова Думка, 1971. – 146 с.

139. Илькун Г.М. Поглощение растениями из воздуха сернистого газа / Г. М. Илькун, А. С. Миронова, В. В. Мортук // Растения и промышленная среда. – Киев: Наукова Думка, 1971. – С. 135–138.

140. Мирошников В. С. Исследование естественного отпада деревьев в сосновых и еловых насаждениях искусственного происхождения / В. С. Мирошников // Лесоведение и лесное хозяйство. Минск: Изд-во Высшей. шк, 1970. – Вып. 3.– С. 119–121.

141. Сергейчик С. А. Роль древесных растений в очищении атмосферного воздуха от газообразных сернистых токсикантов / С. А. Сергейчик // Проблемы фитогигиены и охрана окружающей среды; под ред. Э.И. Слепяна. – Л.: Зоологический институт АН СССР, 1981. – С. 133–136.

142. Воронцов К. В. Лекции по алгоритмам восстановления регрессии / К. В. Воронцов. – М.: ВМК МГУ, 2007. – 64 с.

143. Словарь ботанических терминов / Под. ред. И. А. Дудки. – К.: Наукова думка, 1984. – 308 с.

144. Зайцев Г. Н. Фенология древесных растений / Г. Н. Зайцев. – М.: Наука, 1981. – 120 с.

145. Ulrych T. J. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition / T. J. Ulrych, T. N. Bishop // Reviews of Grophysics and Space Physics, 1975. – Vol. 13. – No. 1. – P. 183–200.

146. De Hoon M. J. L. Open source clustering software / M. J. L. de Hoon, S. Imoto, J. Nolan, S. Miyano // Bioinformatics, 2004. – Vol. 20. – No. 9. – P. 1453–1454.

147. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 352 с.

148. Кирик Е. С. Моделирование и оптимизация робастных оценок функций по наблюдениям / Е. С. Кирик // Труды Международной конференции “Математические модели и методы их исследования” (RDAMM-2001). – Т.6. – Ч.2. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2001. – С. 351–355.

149. Проект організації території національного природного парку «Голосіївський», охорони, відтворення та рекреаційного використання його природних комплексів і об’єктів. – К.: НПП «Голосіївський», 2013. – 303 с.

150. Проект організації та розвитку лісового господарства КП ЛПГ «Конча-Заспа» м. Київ. Голосіївське лісництво. Таксаційний опис, відомості поквартальних підсумків. – Ірпінь: КП ЛПГ «Конча-Заспа», 2010. – 202 с.

151. Дацюк В. В. Вивчення змін лісових екосистем під впливом рекреаційних навантажень на території національного природного парку «Голосіївський» / В. В. Дацюк, О. О. Година // Цілі збалансованого розвитку для України. Матеріали Міжнародної конференції (Київ, 18-19 червня 2013). – Київ: Центр екологічної освіти та інформації, 2013. – С. 197–200.

152. Bunks C. Signal Processing with SciLab / C. Bunks, F. Delebecque, G. Le Vey, S. Steer. – Rocquencourt: INRIA, 2007. – 205 p.

153. Urroz G. E. Time series and spatial data analysis with SciLab / G. E. Urroz. – Logan: InfoClearinghouse, 2001. – 64 p.

154. Станкевич С. А. Определение характеристик фенологического развития растительных сообществ по снимкам RapidEye / С. А. Станкевич, А. А. Козлова, Р. Грисбах // Abstracts of 13th Ukrainian Conference on Space Research.– Eupatoria: Space Research Institute, 2013. – P. 191.

ДОДАТКИ

Додаток А

Дані підсупутникових спостережень на території досліджень

Табл. А.1.

Координати центральних точок ділянок польових вимірювань.

№	X	Y	№	X	Y
L1	50°22'28"	30°30'07"	L26	50°22'33	30°30'44"
L2	50°22'21"	30°29'47"	L27	50°22'56	30°31'27"
L3	50°22'21"	30°29'25"	L28	50°22'56	30°31'07"
L4	50°22'33"	30°29'57"	L29	50°23'06	30°31'31"
L5	50°23'28"	30°30'57"	L30	50°22'59	30°31'15"
L6	50°23'40"	30°30'52"	L31	50°20'33"	30°30'37"
L7	50°23'15"	30°29'55"	L32	50°20'38"	30°30'29"
L8	50°21'48"	30°29'38"	L33	50°21'03"	30°30'13"
L9	50°21'30"	30°30'02"	L34	50°20'50"	30°30'24"
L10	50°21'21"	30°29'21"	L35	50°20'54"	30°30'19"
L11	50°21'46"	30°28'56"	L36	50°28'33"	30°20'11"
L12	50°21'19"	30°29'47"	L37	50°28'04"	30°19'39"
L13	50°22'05"	30°29'43"	L38	50°28'01"	30°19'39"
L14	50°21'25"	30°30'19"	L39	50°28'02"	30°19'44"
L15	50°21'19"	30°29'59"	L40	50°27'59"	30°19'49"
L16	50°21'04"	30°30'09"	L41	50°22'05"	30°29'45"
L17	50°21'02"	30°30'08"	L42	50°22'09"	30°29'57"
L18	50°21'11"	30°30'10"	L43	50°22'21"	30°30'08"
L19	50°28'47"	30°20'05"	L44	50°22'23"	30°30'05"
L20	50°28'53"	30°19'51"	L45	50°22'24"	30°30'17"
L21	50°22'03"	30°31'27"	L46	50°22'10"	30°30'11"
L22	50°22'20"	30°29'49"	L47	50°22'18"	30°29'34"
L23	50°22'07"	30°29'54"	L48	50°22'20"	30°29'26"
L24	50°28'53"	30°19'51"	L49	50°22'18"	30°29'26"
L25	50°22'36	30°30'59"			

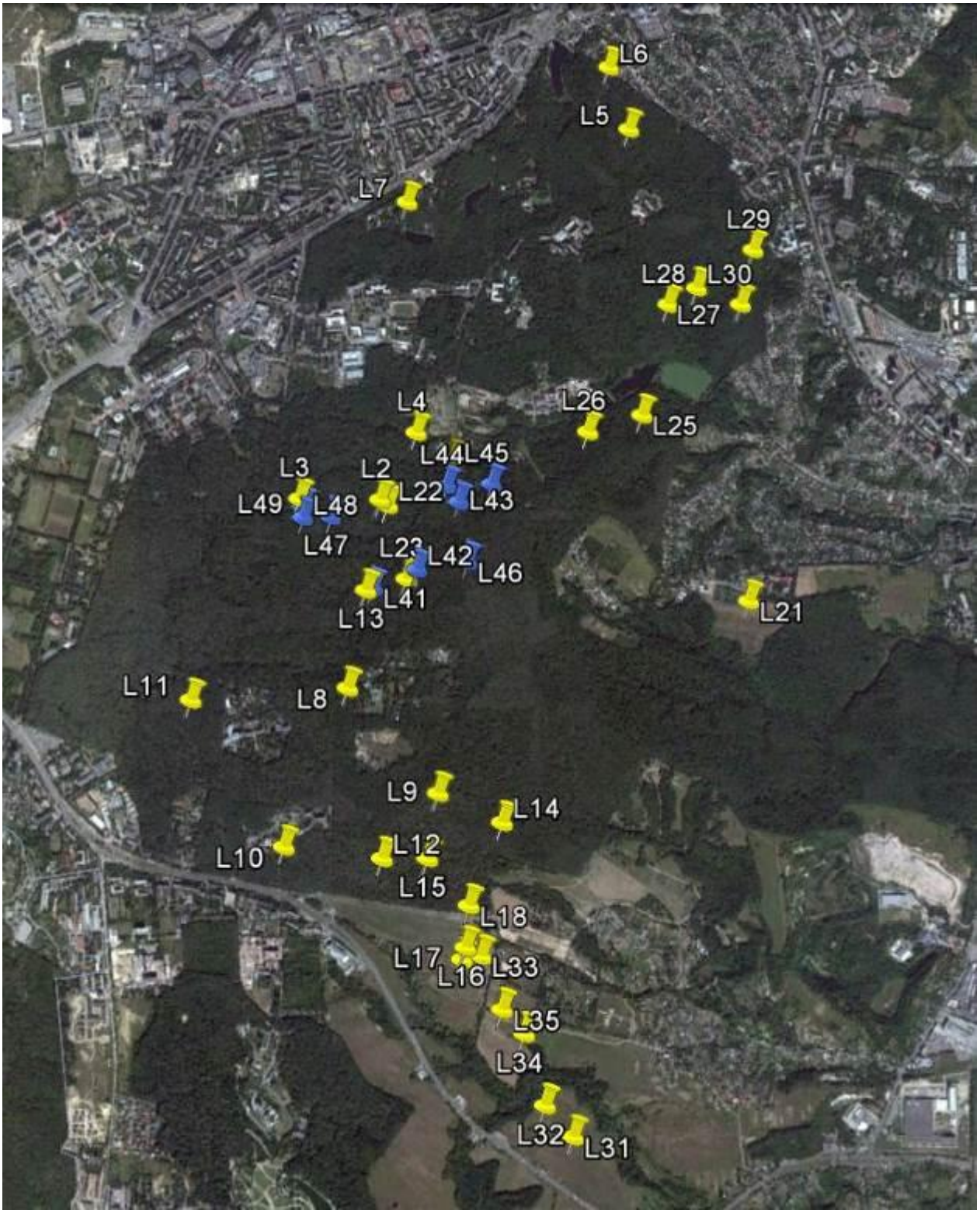


Рис.А.1. Картосхема польових вимірювань на території досліджень

А.2. Зведені таблиці польових вимірювань та камеральної обробки

Таблиця А.2.1.

Польові вимірювання 11 квітня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	3500				F	3500			
N051	2600	1,35	0,67	0,19895	N061	2700	1,30	0,81	0,21269
N052	1300	2,69	1,17	0,19895	N062	2100	1,67	0,98	0,21269
N053	1700	2,06	1,02	0,19895	N063	2100	1,67	1,13	0,21269
N054	2400	1,46	0,97	0,19895	N064	1900	1,84	1,05	0,21269

Таблиця А.2.2.

Польові вимірювання 22 квітня 2013 р.

N	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	4650			
N071	1150	4,04	1,02	0,30117
N072	975	4,77	1,28	0,30117
N073	1150	4,04	1,37	0,30117
N074	1250	3,72	0,69	0,30117

Таблиця А.2.3.

Польові вимірювання 01 травня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	30000				F	30000			
L001	1300	23,08	1,45	0,70725	L003	530	56,60	1,74	0,68017
N011	1125	26,67	1,28	0,70725	N031	965	31,09	1,74	0,68017
N012	850	35,29	1,96	0,70725	N032	500	60,00	1,63	0,68017
N013	1025	29,27	1,13	0,70725	N033	725	41,38	1,64	0,68017
N014	925	32,43	1,47	0,70725	N034	600	50,00	1,87	0,68017
F	30000				F	30000			
L002	850	35,29	1,41	0,71462	L004	950	31,58	1,61	0,74356
N021	600	50,00	1,58	0,71462	N041	900	33,33	1,80	0,74356
N022	915	32,79	1,62	0,71462	N042	1300	23,08	1,68	0,74356
N023	650	46,15	1,09	0,71462	N043	700	42,86	1,77	0,74356
N024	600	50,00	1,29	0,71462	N044	900	33,33	1,77	0,74356

Таблиця А.2.4.

Польові вимірювання 08 травня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	37000				F	37000			
L008	420	88,10	1,47	0,74870	L012	500	74,00	1,83	0,65212
N081	200	185,00	1,78	0,74870	N121	450	82,22	1,41	0,65212
N082	300	123,33	1,73	0,74870	N122	320	115,63	1,89	0,65212
N083	270	137,04	1,93	0,74870	N123	270	137,04	1,99	0,65212
N084	270	137,04	1,7	0,74870	N124	320	115,63	2,52	0,65212
F	37000				F	37000			
L009	330	112,12	2,04	0,69671	L014	185	200,00	1,98	0,71549
N091	320	115,63	1,47	0,69671	N141	200	185,00	1,85	0,71549
N092	400	92,50	1,47	0,69671	N142	220	168,18	1,92	0,71549
N093	360	102,78	1,66	0,69671	N143	205	180,49	1,91	0,71549
N094	330	112,12	1,77	0,69671	N144	140	264,29	1,97	0,71549
F	37000				F	37000			
L010	220	168,18	1,68	0,69940	L015	240	154,17	1,62	0,69962
N101	300	123,33	1,53	0,69940	N151	260	142,31	1,68	0,69962
N102	310	119,35	1,4	0,69940	N152	270	137,04	1,53	0,69962
N103	320	115,63	1,88	0,69940	N153	280	132,14	1,74	0,69962
N104	240	154,17	1,93	0,69940	N154	240	154,17	1,54	0,69962

Таблиця А.2.5.

Польові вимірювання 29 травня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	105000			
L007	15000	7,00	1,17	0,80802
N071	9000	11,67	1,17	0,80802
N072	5000	21,00	1,32	0,80802
N073	4900	21,43	1,32	0,80802
N074	15000	7,00	1,17	0,80802

Таблиця А.2.6.

Польові вимірювання 01 червня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	56000				F	110000			
L003	1000	56,00	1,89	0,8370	N131	1438	1,88	1438	0,7334
N031	1100	50,91	2,01	0,8370	N132	1290	1,93	1290	0,7334
N032	1050	53,33	2,10	0,8370	N133	1460	1,88	1460	0,7334
N033	1100	50,91	1,86	0,8370	N134	1140	1,98	1140	0,7334
N034	1050	53,33	2,10	0,8370	F	100000			
F	56000				L014	600	166,67	2,07	0,7881
L008	750	74,67	2,58	0,8372	N141	1250	80,00	2,15	0,7881
N081	900	62,22	1,92	0,8372	N142	500	200,00	2,47	0,7881
N082	600	93,33	2,26	0,8372	N143	600	166,67	2,39	0,7881
N083	1100	50,91	2,07	0,8372	N144	1000	100,00	1,74	0,7881
N084	750	74,67	2,3	0,8372	F	100000			
F	56000				L015	700	142,86	1,83	0,7809
L009	800	70,00	2,31	0,7575	N151	960	104,17	2,17	0,7809
N091	800	70,00	2,14	0,7575	N152	1200	83,33	2,03	0,7809
N092	750	74,67	2,09	0,7575	N153	750	133,33	2,27	0,7809
N093	1100	50,91	2,17	0,7575	N154	850	117,65	2,17	0,7809
N094	1300	43,08	2,39	0,7575					
F	100000								
L012	1000	100,00	2,09	0,7688					
N121	950	105,26	2,12	0,7688					
N122	600	166,67	2,25	0,7688					
N123	800	125,00	2,2	0,7688					
N124	1000	100,00	2,1	0,7688					

Таблиця А.2.7.

Польові вимірювання 17 червня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	110000				F	110000			
L001	1150	95,65	1,75	0,5729	L008	550	200,00	2,15	0,6813
N011	850	129,41	2,09	0,5729	N081	350	314,29	2,09	0,6813
N012	1320	83,33	2,11	0,5729	N082	600	183,33	2,24	0,6813
N013	800	137,50	2,01	0,5729	N083	500	220,00	1,88	0,6813
N014	600	183,33	2,19	0,5729	N084	800	137,50	1,94	0,6813
F	110000				F	95000			
N021	1000	110,00	1,97	0,76763	L011	750	126,67	1,99	0,5185
N022	730	150,68	2,12	0,76763	N111	500	190,00	2,09	0,5185
N023	570	192,98	2,02	0,76763	N112	350	271,43	2,09	0,5185
N024	950	115,79	2,14	0,76763	N113	500	190,00	1,99	0,5185
F	110000				N114	650	146,15	1,98	0,5185
N031	650	169,23	2,00	0,8109	F	95000			
N032	600	183,33	1,84	0,8109	L013	1300	73,08	2,07	0,7043
N033	650	169,23	2,09	0,8109	N131	790	120,25	2,06	0,7043
N034	550	200,00	2,03	0,8109	N132	1100	86,36	1,94	0,7043
F	110000				N133	760	125,00	2,01	0,7043
N041	550	200,00	2,16	0,7227	N134	780	121,79	2,17	0,7043
N042	520	211,54	2,16	0,7227					
N043	700	157,14	1,82	0,7227					
N044	690	159,42	1,82	0,7227					

Таблиця А.2.8.

Польові вимірювання 21 червня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	TM	№	F_i	F_i/F	TM
F	105000			F	95000		
L016	34000	3,09	0,5211	L018	14500	6,55	0,5562
F	105000			N181	30000	3,17	0,5562
L017	40000	2,63	0,5090	N182	45000	2,11	0,5562

Таблиця А.2.9.

Польові вимірювання 22 червня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	110000				F	110000			
L028	1320	83,33	1,99	0,8169	L030	1200	91,67	1,98	0,8336
N281	670	164,18	2,15	0,8169	N301	1150	95,65	2,22	0,8336
N282	750	146,67	2,12	0,8169	N302	1540	71,43	1,91	0,8336
N283	1200	91,67	2,02	0,8169	N303	700	157,14	2,01	0,8336
N284	820	134,15	1,88	0,8169	N304	920	119,57	2,14	0,8336

Таблиця А.2.10.

Польові вимірювання 26 червня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	85000				F	65000			
L022	550	154,55	2,11	0,6863	L026	530	122,64	2,09	0,7655
N221	720	118,06	2,37	0,6863	N261	460	141,30	2,02	0,7655
N222	510	166,67	1,93	0,6863	N262	430	151,16	2,32	0,7655
N223	540	157,41	2,14	0,6863	N263	650	100,00	2,18	0,7655
N224	480	177,08	1,86	0,6863	N264	440	147,73	2,26	0,7655
F	85000				F	58000			
L023	630	134,92	2,02	0,6644	L027	150	386,67	2,27	0,7643
N231	950	89,47	2,11	0,6644	N271	220	263,64	2,32	0,7643
N232	1030	82,52	2,24	0,6644	N272	190	305,26	2,51	0,7643
N233	560	151,79	2,6	0,6644	N273	330	175,76	2,49	0,7643
N234	750	113,33	2,01	0,6644	N274	180	322,22	2,47	0,7643
F	75000				F	55000			
L025	850	88,24	1,89	0,7427	L029	420	130,95	2,17	0,7988
N251	710	105,63	2,05	0,7427	N291	390	141,03	2,14	0,7988
N252	740	101,35	2,21	0,7427	N292	380	144,74	2,26	0,7988
N253	1100	68,18	2,17	0,7427	N293	510	107,84	2,11	0,7988
N254	650	115,38	1,98	0,7427	N294	480	114,58	2,11	0,7988

Таблиця А.2.11.

Польові вимірювання 08 липня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	95000				F	74000			
L008	1630	58,28	1,98	0,7871	L015	1065	69,48	1,97	0,7321
N081	830	114,46	2,32	0,7871	N151	690	107,25	2,17	0,7321
N082	830	114,46	1,82	0,7871	N152	650	113,85	2,55	0,7321
N083	800	118,75	1,77	0,7871	N153	1140	64,91	1,9	0,7321
N084	450	211,11	1,91	0,7871	N154	685	108,03	1,98	0,7321
F	74000				F	74000			
L009	400	185,00	1,77	0,7223	L016	20000	3,70000		0,4520
N091	530	139,62	1,89	0,7223	F	74000			
N092	350	211,43	2,12	0,7223	N171	14000	5,28571		0,4403
N093	330	224,24	1,75	0,7223	N172	13500	5,48148		0,4403
N094	600	123,33	1,64	0,7223	F	67000			
F	90000				L018	13000	5,15385		0,5003
L010	890	101,12	1,68	0,7600	F	95000			
N101	540	166,67	1,97	0,7600	L021	1450	65,52	2,04	0,6214
N102	720	125,00	2,03	0,7600	N211	1100	86,36	2,04	0,6214
N103	910	98,90	1,85	0,7600	N212	750	126,67	2,07	0,6214
N104	650	138,46	1,78	0,7600	N213	800	118,75	2,07	0,6214
F	90000				N214	1170	81,20	2,07	0,6214
L012	450	200,00	2,2	0,7075	F	95000			
N121	1185	75,95	2,2	0,7075	L023	1120	84,82	1,68	0,6916
N122	715	125,87	2,1	0,7075	N231	1415	67,14	2,06	0,6916
N123	520	173,08	1,75	0,7075	N232	800	118,75	1,96	0,6916
N124	640	140,63	1,64	0,7075	N233	460	206,52	2,1	0,6916
F	95000				N234	1300	73,08	1,95	0,6916
L013	1300	73,08	2,07	0,7043	F	95000			
N131	790	120,25	2,06	0,7043	L025	680	139,71	2,56	0,7531
N132	1100	86,36	1,94	0,7043	N251	420	226,19	2	0,7531
N133	760	125,00	2,01	0,7043	N252	775	122,58	2,15	0,7531
N134	780	121,79	2,17	0,7043	N253	950	100,00	2,06	0,7531
F	74000				N254	750	126,67	2,01	0,7531
L014	520	142,31	2,7	0,7301					
N141	580	127,59	2,09	0,7301					
N142	540	137,04	2,51	0,7301					
N143	1070	69,16	2,57	0,7301					
N144	870	85,06	1,82	0,7301					

Таблиця А.2.12.

Польові вимірювання 09 липня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	76000				F	76000			
L005	8700	8,74	1,03	0,7193	L006	5270	14,42	1,16	0,6856
N051	6350	11,97	1,2	0,7193	N061	2050	37,07	1,62	0,6856
N052	4800	15,83	1,12	0,7193	N062	4300	17,67	1,12	0,6856
N053	845	89,94	2,3	0,7193	N063	8300	9,16	0,99	0,6856
N054	1490	51,01	1,65	0,7193	N064	7700	9,87	1,01	0,6856

Таблиця А.2.13.

Польові вимірювання 12 липня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	66500				F	66500			
L025	1750	38,00	1,88	0,7280	L028	1900	34,21	2,16	0,7555
N251	1750	38,00	2,02	0,7280	N281	2300	28,26	1,86	0,7555
N252	1500	44,33	1,8	0,7280	N282	2250	28,89	1,83	0,7555
N253	1550	42,90	1,88	0,7280	N283	1470	44,22	1,9	0,7555
N254	1820	36,54	2,2	0,7280	N284	1900	34,21	1,78	0,7555
F	66500				F	66500			
L026	920	72,28	2,06	0,7368	L029	1180	55,08	1,99	0,7787
N261	810	82,10	2,61	0,7368	N291	1290	50,39	1,99	0,7787
N262	1190	55,88	2,18	0,7368	N292	1400	46,43	2,23	0,7787
N263	1120	59,38	2,09	0,7368	N293	1320	49,24	2,05	0,7787
N264	1050	63,33	2,26	0,7368	N294	1390	46,76	2,26	0,7787
F	66500				F	66500			
L027	640	103,91	2,27	0,6770	L030	800	81,25	2,01	0,7071
N271	570	116,67	2,43	0,6770	N301	1790	36,31	2,34	0,7071
N272	570	116,67	2,46	0,6770	N302	520	125,00	2,05	0,7071
N273	570	116,67	2,32	0,6770	N303	1470	44,22	2,22	0,7071
N274	600	110,83	2,55	0,6770	N304	1410	46,10	2,18	0,7071

Таблиця А.2.14.

Польові вимірювання 08 серпня 2013 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	78500				F	102000			
L029	702	111,82	1,92	0,7860	L045	1150	88,70	2,08	0,7654
N291	860	91,28	2,07	0,7860	N451	1180	86,44	1,73	0,7654
N292	480	163,54	1,98	0,7860	N452	1090	93,58	1,76	0,7654
N293	520	150,96	1,95	0,7860	N453	870	117,24	2,17	0,7654
N294	440	178,41	1,96	0,7860	N454	1130	90,27	2,26	0,7654
F	89000				F	94000			
L041	1350	65,93	1,63	0,6614	L046	560	167,86	1,93	0,7745
N411	1500	59,33	1,86	0,6614	N461	440	213,64	2,1	0,7745
N412	1880	47,34	1,9	0,6614	N462	790	118,99	2	0,7745
N413	1550	57,42	1,96	0,6614	N463	1000	94,00	2,17	0,7745
N414	1150	77,39	1,95	0,6614	N464	700	134,29	1,89	0,7745
F	91500				F	86500			
L042	750	122,00	1,92	0,7069	L047	610	141,80	1,69	0,8112
N421	720	127,08	2,07	0,7069	N471	640	135,16	2,04	0,8112
N422	800	114,38	2,03	0,7069	N472	530	163,21	1,92	0,8112
N423	760	120,39	1,87	0,7069	N473	600	144,17	1,87	0,8112
N424	870	105,17	1,88	0,7069	N474	650	133,08	2,09	0,8112
F	96500				F	84500			
L043	980	98,47	1,93	0,7331	L048	480	176,04	1,65	0,8057
N431	1100	87,73	1,9	0,7331	N481	530	159,43	1,65	0,8057
N432	1120	86,16	1,68	0,7331	N482	440	192,05	1,97	0,8057
N433	1510	63,91	1,56	0,7331	N483	510	165,69	1,73	0,8057
N434	1090	88,53	1,52	0,7331	N484	550	153,64	1,72	0,8057
F	99000				F	81500			
L044	980	101,02	1,24	0,7457	L049	480	169,79	1,7	0,7930
N441	1100	90,00	1,24	0,7457	N491	630	129,37	1,77	0,7930
N442	1050	94,29	1,6	0,7457	N492	390	208,97	1,79	0,7930
N443	1150	86,09	1,84	0,7457	N493	650	125,38	1,86	0,7930
N444	920	107,61	1,97	0,7457	N494	510	159,80	1,87	0,7930

Таблиця А.2.15.

Польові вимірювання 23 червня 2014 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	107000				F	107000			
L019	4200	25,48	1,77	0,7215	L024	11800	9,07	1,05	0,6120
N191	4400	24,32	1,80	0,7215	N241	13000	8,23	1,12	0,6120
N192	3900	27,44	2,04	0,7215	N242	10700	10,00	1,18	0,6120
N193	5500	19,45	1,63	0,7215	N243	10300	10,39	1,21	0,6120
N194	4800	22,29	1,77	0,7215	N244	12700	8,43	0,96	0,6120
F	107000								
L020	4300	24,88	1,82	0,5568					
N201	6500	16,46	1,61	0,5568					
N202	3700	28,92	2,14	0,5568					
N203	5600	19,11	1,75	0,5568					
N204	6500	16,46	1,68	0,5568					

Таблиця А.2.16.

Польові вимірювання 25 липня 2014 р.

№	F_i	F_i/F	GLA	TM	№	F_i	F_i/F	GLA	TM
F	96000				F	96000			
L037	5400	17,78	1,41	0,6855	L039	5700	16,84	1,43	0,8080
N371	6500	14,77	1,38	0,6855	N391	8500	11,29	1,16	0,8080
N372	6700	14,33	1,62	0,6855	N392	5600	17,14	1,38	0,8080
N373	6800	14,12	1,25	0,6855	N393	6200	15,48	1,26	0,8080
N374	8200	11,71	1,29	0,6855	N394	5400	17,78	1,58	0,8080
F	96000				F	96000			
L038	4600	20,87	1,77	0,7193	L040	5900	16,27	1,12	0,7918
N381	4900	19,59	1,62	0,7193	N401	7900	12,15	1,11	0,7918
N382	5300	18,11	1,69	0,7193	N402	9000	10,67	1,09	0,7918
N383	5800	16,55	0,99	0,7193	N403	5300	18,11	1,47	0,7918
N384	5600	17,14	1,01	0,7193	N404	6200	15,48	1,61	0,7918
F	96000,00								
L036	1420	67,61	1,63	0,7068					
N361	950	101,05	1,88	0,7068					
N362	1260	76,19	1,72	0,7068					
N363	1090	88,07	1,73	0,7068					
N364	820	117,07	2,06	0,7068					

А.3. Кінцеві зображення напівсферичних панорам

N024P	L003P	N031P
N032P	N033P	N034P
N222J	N223J	N224J
N292J	N293J	N294J

Рис.А.3.1. Вибіркові зображення напівсферичних панорам точок дослідження

L019Q	N191Q	N192Q
N193Q	L020Q	N201Q
N202Q	N203Q	N204Q
L024Q	N241Q	N242Q

Рис.А.3.2. Вибіркові зображення напівсферичних панорам точок дослідження

N021P	N022P	N023P
N011P	L002P	N482N
N013G	N032G	N034G
N251J	N261J	N304I

Рис.А.3.3. Вибіркові зображення напівсферичних панорам точок дослідження

Додаток Б

Програмні коди модулів для реалізації розробленої методики оцінювання стану рослинності урбанізованих територій за допомогою багатоспектральних космічних знімків

Б.1. Програмні коди модулів радіометричного калібрування спектральних каналів космічного знімку “Січ-2”/МСУ

Б.1.1. Програмний код модуля розрахунку спектральної опроміненності земної поверхні

```
// Multiband Surface Irradiance
// SciLab v5.4.1 Script, 2005-2013
clear();

function d=JD(year,month,day,hour,minute,second)  // Julian date
   a=(14-month)/12;
   y=year+4800-a;
   m=month+12*a-3;
   n=day+(153*m+2)/5+(365+1/4-1/100+1/400)*y-32045;
   d=n+(hour-12)/24+minute/1440+second/86400;
endfunction

function d=YD(year,month,day)  // day of year
   M=1:(month-1);
   Y=year*ones(M);
   d=sum(eomday(Y,M))+day;
endfunction

function h=SunHeight(latitude,day,hour)  // sine of Sun angle over horizon
   phi=%pi*latitude/180;  // image geographic latitude
   delta=%pi*23.45/180*sin(2*%pi*(284+day)/365);  // Sun declination angle
   tau=%pi*(13-hour)/12;  // local time, hours
   h=sin(phi)*sin(delta) + cos(phi)*cos(delta)*cos(tau);
endfunction

function R=SunRad(L,day)  // Sun radiation spectral distribution
   h=6.626124e-34;  // Plank constant, W·s2
   c=2.997925e8;  // light velocity, m/s
   k=1.380652e-23;  // Bolzmann constant, W·s2/K
   w=2897768.552;  // Wiene constant, nm·K
   s=475;  // Sun max radiancy wawelength, nm
   T=w/s;  // Sun radiation temperature, K
   r=0.696;  // Sun radius, Gm
   D=149.6;  // Sun to Earth distance, Gm
   e=1-0.01674*cos(0.9856*(day-4)); // Sun to Earth distance correction for Julian day
   R=2*%pi*h*c^2/(L/1e9)^5/(exp(h*c/k/(L/1e9)/T)-1)/1e9*(r/D/e)^2; // surface spectral
irradiation, W/m2/nm
endfunction

function R=PlankRad(L,T)  // radiation spectral distribution
   h=6.62517e-34;  // Plank constant, W·s2
   c=2.99793e8;  // light velocity, m/s
   k=1.38054e-23;  // Bolzmann constant, W·s2/K
   epsilon=0.9768;  // average thermal emissivity
```

```
   R=2*%pi*h*c^2/(L/1e9)^5/(exp(h*c/k/(L/1e9)/(T+273.15))-1)*epsilon/1e9; // Plank's
radiancy, W/m2/nm
endfunction

F=[510 590; 610 680; 800 890];  // MSU spectral bands, nm
m=size(F,1);  // number of spectral bands
mprintf('\n   Спектральні сигнатури сенсора (робочих діапазонів = %u)\n\n',m);
A=read('SCIENCE\POLYGON\Calibration\CALC\ATMOS.DAT',-1,2); // atmosphere spectral
transparency
dt=[2011; 10; 5; 9; 4; 55];
day=JD(dt(1),dt(2),dt(3),dt(4),dt(5),dt(6));  // Julian date of image
latitude=50.37; longitude=30.495; // site geographic latitude, degrees
hi=SunHeight(latitude,YD(dt(1),dt(2),dt(3)),dt(4)+dt(5)/60+dt(6)/3600); // Sun height of
image, rad
T=15;  // surface temperature, °C
for i=1:size(A,1),
   R(i)=(SunRad(A(i,1),day)*exp(log(A(i,2))/hi)*cos(%pi/2-hi)+PlankRad(A(i,1),T)); //
surface spectral irradiance, W/m2/nm
end;

for i=1:m,
   L=find((A(:,1)>=F(i,1))&(A(:,1)<=F(i,2))); // inside band wavelenghts, nm
   mprintf(' Спектральній діапазон  %.2f .. %.2f нм\n',F(i,1),F(i,2));
   tau(i)=mean(A(L,2));  // band atmospheric transparency
   mprintf(' Спектральне пропускання атмосфери  %f\n',tau(i));
   radiance(i)=mean(R(L))/%pi;  // band surface irradiance, W/m2/nm/sr
  mprintf(' Спектральна опроміненність поверхні %f Вт/(м2·мкм·ср)\n\n', radiance(i)*1e3);
end;

signature=radiance.*tau*1e3;  // at sensor full spectral radiance, W/m2/nm/sr

// exec('MBIRRAD.SCI');
```

Б.1.2. Програмний код модуля розрахунку спектрального відбиття тестових об’єктів

```
// Spectral Bands Reflectance for Sich-2/MSU Calibration
// SciLab v5.5.1 Script, 2007-2014
clear();

mprintf('\n   Spectral bands reflectance\n');
// X=read('SPECLIB\Grassland\grass_lawn_green.txt',-1,2);
// X=read('SPECLIB\Grassland\grass_green.txt',-1,2);
// X=read('SPECLIB\Grassland\grass_dry_green.txt',-1,2);
// X=read('SPECLIB\Grassland\grass_fescue_wheat.txt',-1,2);
// X=read('SPECLIB\Grassland\grass_dry_gold.txt',-1,2);
X=read('SPECLIB\WATER\silt_water.txt',-1,2);  // spectral library data
n=size(X,1);  // spectral samples number
B=read('SICH.DAT',-1,2);  // spectral bands boundaries
m=size(B,1);  // spectral bands number

for i=1:m,
   F=find((X(:,1)>=B(i,1))&(X(:,1)<=B(i,2)));  // spectral band samples
   R(i)=mean(X(F,2));  // spectral band average reflectance
   mprintf('spectral band %3f .. %3f µm average reflectance=%8.6f\n',B(i,1),B(i,2),R(i));
end;

// exec('SICHCAL.SCI');
```

Б.1.3. Листінг протоколу радіометричного калібрування спектральніх каналов багатоспектральної апаратури МСУ супутникової системи “Сич-2”

```
Спектральний діапазон = 510 .. 590 нм
Спектральне пропускання атмосфери = 0.896165
Спектральна опроміненність поверхні = 285.170976 Вт/(м2·мкм·ср)

Спектральний діапазон = 610 .. 680 нм
Спектральне пропускання атмосфери = 0.913336
Спектральна опроміненність поверхні = 257.771515 Вт/(м2·мкм·ср)

Спектральний діапазон = 800 .. 890 нм
Спектральне пропускання атмосфери = 0.841547
Спектральна опроміненність поверхні = 152.10062 Вт/(м2·мкм·ср)

spectral band 0.51 .. 0.59 µm average reflectance = 0.119739 (vegetation) DN = 144.545732
L = 30.600529 Вт/(м2·мкм·ср)
spectral band 0.61 .. 0.68 µm average reflectance = 0.110548 (vegetation) DN = 155.814024
L = 26.026537 Вт/(м2·мкм·ср)
spectral band 0.80 .. 0.89 µm average reflectance = 0.615859 (vegetation) DN = 185.253049
L = 78.829841 Вт/(м2·мкм·ср)

spectral band 0.51 .. 0.59 µm average reflectance = 0.198566 (silt water) DN = 134.875969
L = 50.745576 Вт/(м2·мкм·ср)
spectral band 0.61 .. 0.68 µm average reflectance = 0.141518 (silt water) DN = 148.689922
L = 33.317866 Вт/(м2·мкм·ср)
spectral band 0.80 .. 0.89 µm average reflectance = 0.051279 (silt water) DN = 108.395349
L = 6.5637028 Вт/(м2·мкм·ср)

Green = 1.9324 (DN-123) + 0.48
Red = 1.987 (DN-137) + 0.977
NIR = 0.815 (DN-102) + 3.282
```

Б.2. Програмні коди модулів оцінки кількості рослинності урбанізованих територій

Б.2.1. Програмний код модуля розрахунку параметрів оптимальної сплайн-інтерполяції

```
// Optimal Least Squares Spline Approximation
// SciLab v5.4.1 Script , 2014
clear();

X=read('MIXED.DAT',-1,4);  // NDVI - LAI measurements
V=X(:,1);  // NDVI data
A=X(:,2);  // geomtric LAI data
G=X(:,3);  // LGA LAI data
F=log(X(:,4));  // photometric LAI data
T=tabul(V,'i');
D=T(:,1);  // NDVI approximation nodes
n=size(D,1);  // approximation nodes number

for i=1:n, E(i)=mean(A(find(V==D(i)))); end;
Df=[0.792; 0.806; 0.814; 0.824; 0.856];
Ef=[1.998; 2.462; 2.342; 2.12; 2.395];
for i=1:n, Q(i)=sum((A(find(V==D(i)))-E(i)).^2); end;
Rq=1-sum(Q)/sum((A-mean(A)).^2);  // determination coefficient R^2 = 0.721

for i=1:n, K(i)=mean(G(find(V==D(i)))); end;
// Df=[0.792; 0.806; 0.814; 0.824; 0.856];
// Kf=[1.78; 2.05; 1.954; 1.7225; 2.0625];
// for i=1:n, Q(i)=sum((G(find(V==D(i)))-K(i)).^2); end;
// Rq=1-sum(Q)/sum((G-mean(G)).^2);  // determination coefficient R^2 = 0.778

// for i=1:n, Y(i)=mean(F(find(V==D(i))))/2; end;
// Df=[0.792; 0.806; 0.814; 0.824; 0.856];
// Yf=[2.1467054; 2.3170264; 2.3834679; 2.2093205; 2.4662504];
// for i=1:n, Q(i)=sum((F(find(V==D(i)))/2-Y(i)).^2); end;
// Rq=1-sum(Q)/sum((F/2-mean(F)/2).^2);  // determination coefficient R^2 = 0.875

S=splin(Df,Ef);  // approximating cubic spline
H=0.78:0.001:0.87;  // NDVI interpolating points
P=interp(H,Df,Ef,S,"linear");  // cubic spline interpolated LAI
clf(); plot(H,P,'-r',V,A,'dg');

// exec('OSPLREG.SCI');
```

Б.2.2. Програмний код модуля розрахунку LAI за допомогою сплайн-регресії

```
// Goloseevo LAI restoration by spline regression
// SciLab v5.4.1 Script, 2014
clear(); stacksize('max');
mprintf('\n   LAI calculation using NDVI spline regression\n');

l=648; n=812;  // NDVI image size, lines x samples
X=read('ALI-Kiev-2011-NDVI.dat',l,n);  // NDVI image
D=read('GT-Kiev-2011-NDVI.csv',-1,1);  // ground-truth NDVI
E=read('GT-Kiev-2011-LAI.csv',-1,1);  // ground-truth LAI
mprintf('   NDVI data %u x %u samples loaded\n',l,n);
C=osplreg(D,E);  // approximating cubic spline

progress=waitbar('lines processed : '+string(l));
for i=1:l,
   Y(i,:)=interp(X(i,:),D,E,C,"linear");  // spline interpolation
   waitbar(i/l,'lines processed : '+string(l-i),progress);
end;
close(progress);
Y(find(Y<0))=0;
mprintf('   LAI data calculation complete\n');

dat=mopen('ALI-Kiev-2011-LAI.dat','wt');
for i=1:l, for j=1:n, mfprintf(dat,'%9.6f',Y(i,j)); end; mfprintf(dat,'\n'); end;
mclose(dat);
mprintf('   LAI data output complete\n');

// exec('MSI-LAI.SCI');
```

Б.3. Програмний код модуля розрахунку показників RET і REP методом сплайн-інтерполяції

```
// Multispectral Imagery Red Edge Derivative and Position by Spline
// SciLab v5.4.1 Script, 2008-2013
clear();

function [ret,rep]=retf(b,g,dg,r,dr,n,dn,s,v,f,h)   // spline interpolating without red-
edge band
   X=[b  g  r  n];  Y=[s  v  f  h];  C=[(v-s)/(g-b)  0.3*(1-(h-0.25)/0.75)];    //  spline
interpolating without red-edge band
   D=splin(X,Y,"clamped",C);  // interpolating cubic spline derivatives
   K=interp([g-dg  g+dg  r-dr  r+dr  n-dn  n+dn],X,Y,D,"linear");     //  cubic  spline
interpolated bands
   dv=v-mean([K(1,1) v K(1,2)]);  // green band correction
   df=f-mean([K(1,3) f K(1,4)]);  // red band correction
   dh=h-mean([K(1,5) h K(1,6)]);  // nir band correction
   X=[g-dg g g+dg r-dr r r+dr n-dn n n+dn]; Y=[K(1,1)+dv v+dv K(1,2)+dv K(1,3)+df f+df
K(1,4)+df K(1,5)+dh h+dh K(1,6)+dh];
   D=splin(X,Y,"clamped",C);  // interpolating cubic spline derivatives
   L=(floor(1e3*(g-dg)):ceil(1e3*(n+dn)))/1e3;  // interpolating wavelength, um
   P=interp(L,X,Y,D,"linear");  // cubic spline interpolated spectra
   Z=diff(P)./diff(L);  // red edge spread function
   ret=max(Z);  // red edge tangent
   Rh=L(find(Z==ret));
   rep=Rh(1);  // red edge position
endfunction

function [ret,rep]=retb(g,dg,r,dr,n,dn,v,f,h)  // spline interpolating without blue band
   X=[g  r  n];  Y=[v  f  h];  C=[abs((f-v)/(r-g))  0.3*(1-(h-0.25)/0.75)];    //  spline
interpolating without blue band
   D=splin(X,Y,"clamped",C);  // interpolating cubic spline derivatives
   K=interp([g-dg  g+dg  r-dr  r+dr  n-dn  n+dn],X,Y,D,"linear");     //  cubic  spline
interpolated bands
   dv=v-mean([K(1,1) v K(1,2)]);  // green band correction
   df=f-mean([K(1,3) f K(1,4)]);  // red band correction
   dh=h-mean([K(1,5) h K(1,6)]);  // nir band correction
   X=[g-dg g g+dg r-dr r r+dr n-dn n n+dn]; Y=[K(1,1)+dv v+dv K(1,2)+dv K(1,3)+df f+df
K(1,4)+df K(1,5)+dh h+dh K(1,6)+dh];
   D=splin(X,Y,"clamped",C);  // interpolating cubic spline derivatives
   L=(floor(1e3*(g-dg)):ceil(1e3*(n+dn)))/1e3;  // interpolating wavelength, um
   P=interp(L,X,Y,D,"linear");  // cubic spline interpolated spectra
   Z=diff(P)./diff(L);  // red edge spread function
   ret=max(Z);  // red edge tangent
   Rh=L(find(Z==ret));
   rep=Rh(1);  // red edge position
endfunction

function [ret,rep]=rete(g,r,dr,e,de,n,dn,v,f,u,h)  // spline interpolating with red-edge
band
   X=[r e n]; Y=[f u h]; C=[(f-v)/(r-g) 0.3*(1-(h-0.25)/0.75)];  // spline interpolating
with red-edge band
   D=splin(X,Y,"clamped",C);  // interpolating cubic spline derivatives
   K=interp([r-dr  r+dr  e-de  e+de  n-dn  n+dn],X,Y,D,"linear");     //  cubic  spline
interpolated bands
   df=f-mean([K(1,1) f K(1,2)]);  // red band correction
   du=u-mean([K(1,3) u K(1,4)]);  // red-edge band correction
   dh=h-mean([K(1,5) h K(1,6)]);  // nir band correction
   X=[r-dr r r+dr e-de e e+de n-dn n n+dn]; Y=[K(1,1)+df f+df K(1,2)+df K(1,3)+du u+du
K(1,4)+du K(1,5)+dh h+dh K(1,6)+dh];
   D=splin(X,Y,"clamped",C);  // interpolating cubic spline derivatives
   L=(floor(1e3*(g-dg)):ceil(1e3*(n+dn)))/1e3;  // interpolating wavelength, um
   P=interp(L,X,Y,D,"linear");  // cubic spline interpolated spectra
   Z=diff(P)./diff(L);  // red edge spread function
   ret=max(Z);  // red edge tangent
   Rh=L(find(Z==ret));
   rep=Rh(1);  // red edge position
endfunction
```

```
function [ret,rep]=retre(g,r,e,n,v,f,u,h)  // spline interpolating with red-edge band
   X=[r e n]; Y=[f u h]; C=[(f-v)/(r-g) 0.3*(1-(h-0.25)/0.75)];  // spline interpolating
with red-edge band
   D=splin(X,Y,"clamped",C);  // interpolating cubic spline derivatives
   L=(floor(1e3*g):ceil(1e3*n))/1e3;  // interpolating wavelength, um
   P=interp(L,X,Y,D,"linear");  // cubic spline interpolated values
   Z=diff(P)./diff(L);  // red edge spread function
   ret=max(Z);  // red edge tangent
   Rh=L(find(Z==ret));
   rep=Rh(1);  // red edge position
endfunction

mprintf('\n   Red edge derivative and position by multispectral data interpolation\n');

g=0.555; dg=0.035; r=0.6575; dr=0.0275; e=0.71; de=0.02; n=0.805; dn=0.045; // spectral
bands rapideye
// b=0.485; db=0.035; g=0.56; dg=0.04; r=0.66; dr=0.03; n=0.835; dn=0.065; // spectral
bands landsat
// b=0.48; db=0.03 g=0.56; dg=0.03; r=0.655; dr=0.015; n=0.865; dn=0.015; // spectral
bands oli
// g=0.55; dg=0.04; r=0.645; dr=0.035; n=0.845; dn=0.045;  // spectral bands sich

nl=756; ns=618;  // multispectral image size, lines x samples
// nl=1032; ns=1158;
// nl=880; ns=940;
// Gbi=read('Sich2-Goloseevo-2011-Green.dat',nl,ns);  // green band surface reflectance
// Rbi=read('Sich2-Goloseevo-2011-Red.dat',nl,ns);  // red band surface reflectance
// Nbi=read('Sich2-Goloseevo-2011-NIR.dat',nl,ns);  // NIR band surface reflectance
Gbi=read('AC_2011-04-25_BURE-G.dat',nl,ns);  // green band surface reflectance
Rbi=read('AC_2011-04-25_BURE-R.dat',nl,ns);  // red band surface reflectance
Ebi=read('AC_2011-04-25_BURE-E.dat',nl,ns);  // red-edge band surface reflectance
Nbi=read('AC_2011-04-25_BURE-N.dat',nl,ns);  // NIR band surface reflectance
// Bbi=read('AC_2011-11-09_KDRE-B.dat',nl,ns);  // blue band surface reflectance
// Gbi=read('AC_2011-11-09_KDRE-G.dat',nl,ns);  // green band surface reflectance
// Rbi=read('AC_2011-11-09_KDRE-R.dat',nl,ns);  // red band surface reflectance
// Nbi=read('AC_2011-11-09_KDRE-N.dat',nl,ns);  // NIR band surface reflectance
mprintf('   multispectral data %u x %u samples loaded\n',nl,ns);

progress=waitbar('Image lines : '+string(nl));
for i=1:nl, for j=1:ns,
// [Rt(i,j),Rp(i,j)]=retb(g,dg,r,dr,n,dn,Gbi(i,j),Rbi(i,j),Nbi(i,j));
 [Rt(i,j),Rp(i,j)]=retf(b,g,dg,r,dr,n,dn,Bbi(i,j),Gbi(i,j),Rbi(i,j),Nbi(i,j));
// [Rt(i,j),Rp(i,j)]=rete(g,r,dr,e,de,n,dn,Gbi(i,j),Rbi(i,j),Ebi(i,j),Nbi(i,j));
// [Rt(i,j),Rp(i,j)]=retre(g,r,e,n,Gbi(i,j),Rbi(i,j),Ebi(i,j),Nbi(i,j));
end; waitbar(i/nl,'Image lines : '+string(nl-i),progress); end;
close(progress);

dat=mopen('AC_2011-04-25_BURE-REP.dat','wt');
for i=1:nl, for j=1:ns,
   mfprintf(dat,'%9.6f',Rp(i,j));
end; mfprintf(dat,'\n'); end;
mclose(dat);
mprintf('   red edge position output complete\n');

dat=mopen('AC_2011-04-25_BURE-RET.dat','wt');
for i=1:nl, for j=1:ns,
   mfprintf(dat,'%10.6f',Rt(i,j));
end; mfprintf(dat,'\n'); end;
mclose(dat);

mprintf('   red edge tangent output complete\n');

// exec('MSIRESP.SCI');
```

Б.4. Програмний код модуля LOWESS для робастного згладжування

```
/-----------------------------------------------------------------------------
// Written by Philippe.CASTAGLIOLA@univ-nantes.fr
// Universitй de Nantes & IRCCyN UMR CNRS 6597
//-----------------------------------------------------------------------------
function Y=lowess(X,X0,Y0,h)
//-----------------------------------------------------------------------------
[argout,argin]=argn()
if argin~=4
  error("incorrect number of arguments")
end
[n,p]=size(X)
[n0,p0]=size(X0)
if (p~=p0)
  error("arguments ''X'' and ''X0'' have incompatible sizes")
end
[ny0,py0]=size(Y0)
if (n0~=ny0)|(py0~=1)
  error("arguments ''X0'' and ''Y0'' have incompatible sizes")
end
if (h<=0)|(h>1)
  error("argument ''h'' must be in (0,1]")
end
m=ceil(h*n0)
for i=1:n
  Xi=X(i,:)
  [D,j]=sort(-sqrt(sum((ones(n0,1)*Xi-X0).^2,"c")))
  Dmax=-D(m)
  D=-D(1:m-1)
  k=j(1:m-1)
  Xk0=X0(k,:)
  Yk0=Y0(k)
  W=diag((1-(D/Dmax).^3).^3)
  Zk0=doxpand(Xk0,"x")
  Zk0=W*Zk0
  Yk0=W*Yk0
  a=inv(Zk0'*Zk0)*Zk0'*Yk0
  Y(i)=[1,Xi]*a
end
endfunction
```

Б.5. Програмний код модуля аналізу часових серій багатоспектральних космічних знімків

```
// Time serie parameters extimation for year-long data product
// SciLab v5.4.1 Script, 2012-213
clear(); stacksize('max');

function [w,a,p,h]=tspa(X)  // time serie pixel analysis
   if sum(X)>0 then
      w=mean(X);  // average value
      T=[115,142,198,214,236,246,314];  // time serie, days
      m=365;  // year period, days
      a=1e3*reglin(T,X);  // daily increment, ‰
      [S,F]=mese(detrend(X,'l'),m);  // maximum entropy spectral estimation
      p=1e3*S(1,m)/sum(S);  // daily periodic factor, ‰
      R=find(S==max(S));  // resonance frequency
      h=2*m*F(R(1));  // significant period
   else
      w=0; a=0; p=0; h=0;
   end;
endfunction

mprintf('\n   Time serie parameters estimation\n');
l=1032; n=1158;  // image size, lines x pixels
W1=read('NDVI_2011-04-25_KDRE.DAT',l,n);
W2=read('NDVI_2011-05-22_KDRE.DAT',l,n);
W3=read('NDVI_2011-07-18_KDRE.DAT',l,n);
W4=read('NDVI_2011-08-04_KDRE.DAT',l,n);
W5=read('NDVI_2011-08-26_KDRE.DAT',l,n);
W6=read('NDVI_2011-09-05_KDRE.DAT',l,n);
W7=read('NDVI_2011-11-09_KDRE.DAT',l,n);
mprintf('   Time serie imagery data loaded\n');

progress=waitbar('Imagery lines: '+string(l));
for i=1:l,
   for j=1:n,

[W(i,j),A(i,j),P(i,j),H(i,j)]=tspa([W1(i,j),W2(i,j),W3(i,j),W4(i,j),W5(i,j),W6(i,j),W7(i,
j)]);
   end;
   waitbar(i/l,'Imagery lines: '+string(l-i),progress);
end;
winclose(progress);
mprintf('   Time serie analysis complete\n');
mprintf('   Average value = %.4f, annual increment = %.4f percent,\n   annual periodicity
= %.4f promille, significant period = %.1f days\n',mean(W),mean(A),mean(P),mean(H));

dat=mopen('NDVI_KDRE_Mean.dat','wt');
for i=1:l, for j=1:n, mfprintf(dat,'%11.7f',W(i,j)); end; mfprintf(dat,'\n'); end;
mclose(dat);
dat=mopen('NDVI_KDRE_Annual.dat','wt');
for i=1:l, for j=1:n, mfprintf(dat,'%12.7f',A(i,j)); end; mfprintf(dat,'\n'); end;
mclose(dat);
dat=mopen('NDVI_KDRE_Periodic.dat','wt');
for i=1:l, for j=1:n, mfprintf(dat,'%11.7f',P(i,j)); end; mfprintf(dat,'\n'); end;
mclose(dat);
dat=mopen('NDVI_KDRE_Resonance.dat','wt');
for i=1:l, for j=1:n, mfprintf(dat,'%6.1f',H(i,j)); end; mfprintf(dat,'\n'); end;
mclose(dat);
mprintf('   Time serie parameters output complete\n');

// exec('TSPA-RESP.SCI');
```

Додаток В

Опис патенту України на винахід

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 109210

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ РОЗРІЗНЕННОСТІ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ СКАНУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИМ ВІКНОМ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи **27.07.2015.**

Голова Державної служби інтелектуальної власності України А.Г. Жарінова

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552556
№1

УКРАЇНА

(19) UA (11) 109210 (13) C2

(51) МПК
G06K 9/46 (2006.01)
G06K 9/62 (2006.01)
G06K 9/68 (2006.01)
G01V 8/20 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: **a 2014 01471**

(22) Дата подання заявки: **14.02.2014**

(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **27.07.2015**

(41) Публікація відомостей про заявку: **25.02.2015, Бюл.№ 4**

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **27.07.2015, Бюл.№ 14**

(72) Винахідник(и):
Попов Михайло Олексійович (UA),
Станкевич Сергій Арсенійович (UA),
Козлова Анна Олександрівна (UA),
Пєстова Ірина Олександрівна (UA),
Лубський Микола Сергійович (UA)

(73) Власник(и):
ДЕРЖАВНА УСТАНОВА "НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ",
вул. Олеся Гончара, 55-б, м. Київ, 01601 (UA)

(74) Представник:
Цимбал Тетяна Володимирівна

(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
UA 81195 C2, 10.12.2007
UA 75299 C2, 15.03.2006
CN 1877636 A, 13.12.2006
US 6480273 B1, 12.11.2002
RU 2451338 C1, 20.05.2012
CN 102799903 A, 28.11.2012
CN 103268618 A, 28.08.2013
WO 2005086890 A2, 22.09.2005

UA 109210 C2

(54) СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ РОЗРІЗНЕННОСТІ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ СКАНУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИМ ВІКНОМ

(57) Реферат:

Спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень за допомогою сканування спектральним вікном належить до напрямку обробки багатоспектральних зображень, що отримуються аерокосмічними системами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). В кожному елементі вхідного багатоспектрального зображення відновлюється спектр високої розрізненності об'єкта сцени в необхідному спектральному діапазоні за допомогою сканування ковзним спектральним вікном для фільтрації шумів. Використання даного підходу дозволяє значно підвищити спектральну розрізненність багатозональних аерокосмічних зображень та знизити вплив випадкових шумів на достовірність зображення.

Винахід належить до напрямку обробки багатоспектральних зображень, які отримують за допомогою аерокосмічних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Більшість систем ДЗЗ мають декілька спектральних каналів, кількість яких обмежена одиницями. Такі сенсори охоплюють спектральний діапазон від ультрафіолетового до теплового інфрачервоного, і спектральний інтервал каналів складає в середньому 20-50 нм у видимому, 50-100 нм у ближньому інфрачервоному, 100-200 нм у середньому інфрачервоному та близько 1 мкм у тепловому інфрачервоному діапазоні. Іншим типом сенсорів є гіперспектральні системи, які мають десятки спектральних каналів з вузькими (5-10 нм) діапазонами спектральної чутливості. Але через високі енергетичні обмеження гіперспектральні сенсори не дають можливості отримувати багатоспектральні зображення середньої та високої просторової розрізненності. Тому підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень є актуальною задачею.

Існує значна кількість апаратних методів підвищення спектральної розрізненності, серед яких використання цифрових спектроаналізаторів для збільшення кількості спектральних каналів [1], використання спеціалізованих трансд'юторів [2], резонаторів Фабрі-Перо [3], застосування оптичних процесорів обробки зареєстрованого випромінювання з метою виявлення тонких спектральних структур [4].

Недоліком апаратного підходу до підвищення спектральної розрізненності цифрових аерокосмічних зображень є необхідність обробки оптичного сигналу безпосередньо при його реєстрації в реальному часі, що значно ускладнює роботу знімальної системи і підвищує її вартість.

Натомість існують способи програмної обробки багатоспектральних зображень задля підвищення спектральної розрізненності, одним з яких є спосіб корекції спектральних діапазонів гіперспектральної системи, за допомогою якого одержуються функції спектральної чутливості різних зональних каналів багатозонального аерокосмічного знімка, визначаються значення сигналів пікселів у кожному зональному каналі цифрового зображення та застосовується вказане значення до кожного піксела до кожного зонального каналу [5].

Недоліком даного способу є неможливість отримання додаткових зональних цифрових зображень.

Відомий спосіб одержання додаткових зональних зображень багатозонального цифрового аерокосмічного знімка - патент України на винахід UA 75299 - аналог [6], при якому підвищення спектральної розрізненності зображень досягається за рахунок одержання функцій спектральної чутливості каналів, що перекриваються за спектром та визначення функції спектральної чутливості додаткового зонального каналу аерокосмічного знімка.

Недоліком цього способу є необхідність взаємного перекриття суміжних спектральних каналів та недостатня точність інтерполяції, яка є наслідком неврахування спектрорадіометричних характеристик об'єктів, які охоплює сцена, що знижує достовірність відтворення додаткових зональних зображень.

Також відомий спосіб комплексування цифрових напівтонових телевізійних і тепловізійних зображень - патент Російської Федерації на винахід RU 2451338 - аналог [7], в якому виконують синтезування більш інформативного зображення, що містить елементи зображень однієї і тієї ж сцени, одержаних в різних спектральних діапазонах.

Недоліком цього способу є непов'язаність характеристик синтезованого зображення із реальними спектрорадіометричними властивостями об'єктів сцени, що унеможливлює їх подальше фізичне моделювання.

Ще один відомий спосіб формування багатозонального зображення підвищеної просторової розрізненності - патент Китаю на винахід CN 1877636 - аналог [8], в якому одержують зональні зображення підвищеної просторової розрізненності шляхом відновлення багатовимірної регресії між оригінальними зональними зображеннями низької просторової розрізненності та опорним панхроматичним зображенням високої просторової розрізненності.

Недоліком цього способу є можливість одержувати зональні зображення підвищеної просторової розрізненності лише в тих же самих спектральних діапазонах, що і оригінальні зональні зображення низької просторової розрізненності.

Найбільш близьким технічним рішенням до способу, що пропонується є спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень - патент України на винахід UA 81195 - прототип [9], при якому здійснюється радіометричне калібрування багатоспектрального аерокосмічного зображення із залученням наборів спектрів об'єктів сцени, що відбираються на основі аналізу складу об'єктів сцени із перерахунком відібраних об'єктів сцени до спектральних сигнатур вказаних об'єктів на багатоспектральному аерокосмічному знімку та за набором спектральних сигнатур виконується класифікування спектральних сигнатур

кожного елемента знімка, тим самим одержується підвищення спектральної розрізненності багатоспектрального знімка.

Недоліком прототипу є значна нараженість впливу шумів, завжди присутніх в реальних аерокосмічних зображеннях, що понижує достовірність класифікації об'єктів сцени та спричиняє похибки відновлення додаткового спектрального сигналу.

В практиці цифрової обробки відомий спосіб придушення шумів із застосуванням усереднення значень спектра у вікні.

Попередньо для радіометрично відкаліброваного багатоспектрального аерокосмічного зображення виконується аналіз об'єктів сцени для визначення коефіцієнтів передавання спектральних каналів сенсора. На основі даного аналізу зі спектральних бібліотек відбираються спектри наявних об'єктів, що перераховуються до спектральних сигнатур даних об'єктів, за якими виконується класифікування об'єктів сцени із розрахунком імовірностей належності даної сигнатури кожному з об'єктів сцени. На основі даного класифікування виконується підвищення спектральної розрізненності багатоспектрального зображення, в основу якого покладено використання ковзного спектрального вікна з попередньо обраними шириною та кроком, що застосовується для фільтрації шумів, і відновлення необхідної кількості спектральних відліків об'єктів сцени у кожній точці зображення, з попереднім врахуванням фізичних (спектральних) характеристик об'єктів сцени із бібліотеки спектрів, що відповідає критерію "новизна" і дозволить усунути недоліки, притаманні прототипу.

Необхідну послідовність операцій способу, що пропонується, показано на схемі Фіг. 1.

Для наявного багатоспектрального аерокосмічного зображення (1), здійснюється його радіометричне калібрування в основу якого покладено перерахунок власних цифрових значень сенсора у фізичне значення відбитої електромагнітної енергії (2) для визначення коефіцієнтів передавання спектральних каналів сенсора, виконується попередній аналіз складу сцени багатоспектрального аерокосмічного зображення з виділенням окремих об'єктів, що дійсно наявні на даній території (3), за результатами якого з існуючої бібліотеки спектрів (4) відбирається набір електромагнітних спектрів виділених об'єктів сцени (5). Описаним в прототипі способом виконується перерахунок (6) відібраних спектрів об'єктів сцени до спектральних сигнатур вказаних об'єктів на багатоспектральному аерокосмічному знімку. За набором спектральних сигнатур об'єктів сцени проводиться класифікування спектральної сигнатури кожного елемента багатоспектрального аерокосмічного зображення (піксела), за результатами класифікування обчислюються вектор апостеріорних імовірностей належності даної спектральної сигнатури кожному з об'єктів сцени (7), далі на основі спектральних характеристик об'єктів сцени та відповідних апостеріорних імовірностей із застосуванням ковзного вікна із попередньо вибраною на основі спектральної розрізненності спектральних бібліотек шириною та кроком сканування (8) послідовним зміщенням спектрального вікна в межах необхідного спектрального діапазону на вибраний крок розраховуються спектральні відліки в усій ширині вікна, і приписуються центральній довжині хвилі вікна. Цю операцію виконують для кожного з елементів зображення (9) і таким чином в кожному елементі вхідного багатоспектрального зображення формується спектр високої розрізненності об'єкта сцени в необхідному спектральному діапазоні, які в сукупності утворюють вихідне зображення підвищеної спектрадьної розрізненності (10).

Вибір ширини спектрального вікна визначається рівнем шумів, що притаманні вимірюванням спектральних сигнатур об'єктів сцени за вхідним багатоспектральним зображенням, а крок зміщення вікна - потрібною спектральною розрізненністю відновлення спектра для вирішуваної задачі, але цей крок не може бути меншим, ніж спектральна розрізненність спектрів, що містяться в робочій бібліотеці.

На фіг. 2 продемонстровано можливість відновлення спектральної характеристики рослинності в діапазоні 440-850 нм (а) в одному пікселі п'ятиспектрального каліброваного космічного знімка супутникової системи ДЗЗ RapidEye (б) за викладеним способом.

Отже в запропонованому способі запропонована послідовність та умови виконання дій для підвищення спектральної розрізненності багатоспектрального аерокосмічного знімка на основі класифікування спектральних сигнатур об'єктів із скануванням ковзним спектральним вікном, що на відміну від прототипу дозволяє покращити точність одержання спектральних характеристик об'єктів за рахунок фільтрації шумів не для всього вибраного спектрального діапазону, а для кожного його спектрального відліку в межах спектрального діапазону та спектральної розрізненності спектральних бібліотек, що використовувалися.

Джерела інформації:

1. Lehmann J.L., Lynch F. Fully digital spectrum analyzer using time compression and discrete Fourier transform techniques / United States Patent No 3,984,669-October 5, 1976.

2. Morawski R.Z., Barwicz A., Slima M.B., Miekina A. Method of interpreting spectrometric data / United States Patent No 5,991,023-November 23, 1999.

3. Fang L., Yao J., Shi Z., Qiu C., Zhou C. Spectral resolution enhancement method based on Fabry-Perot cavity scanning filtering / China Patent No CN103308168. - 2013-09-18.

4. Barwicz A., Morawski R.Z., Slima M.B. Apparatus and method for light spectrum measurement / United States Patent No 5,400,265. - March 21, 1995.

5. Block J.C., Davis R.L. Multispectral imaging system and method / United States Patent No 6,480,273. - November 12, 2002.

6. Мосов С.П., Станкевич С.А., Попов М.О., Волошин В.І. Спосіб одержання додаткових зональних зображень багатозонального цифрового аерокосмічного знімка / Патент України на винахід № 75299. - 15.03.2006.

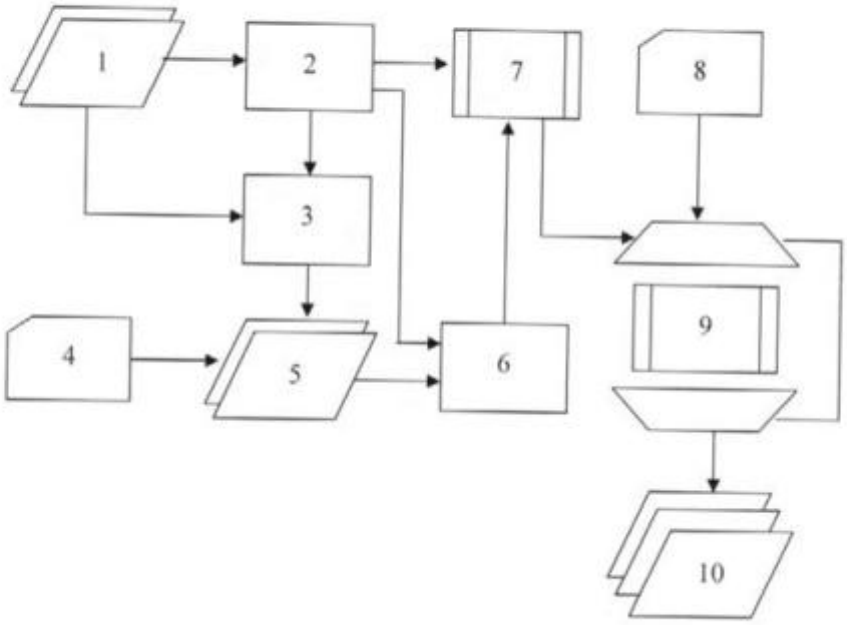
7. Богданов А.П., Костяшкин Л.Н., Морозов А.В., Павлов О.В., Романов Ю.Н., Рязанов А.В. Способ комплексирования цифровых полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений / Патент Российской Федерации № 2451338. - 20.05.2012.

8. Tang P. Method for fusion generation of high-resolution multi-spectral image /Patent of China No 1877636. - 13.12.2006.

9. Попов М.О., Станкевич С.А., Козлова А.О. Спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень / Патент України на винахід № 81195. - 10.12.2007.

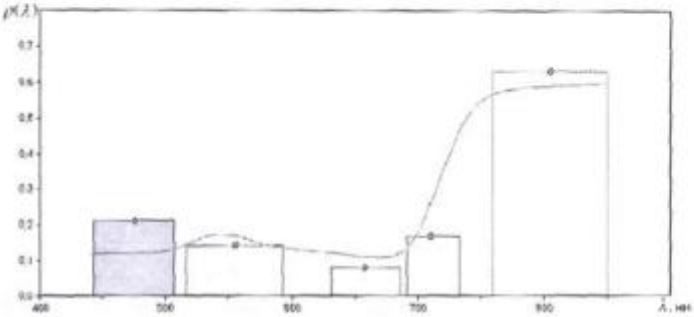
ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень за допомогою сканування спектральним вікном, при якому здійснюють радіометричне калібрування багатоспектрального аерокосмічного зображення, проводять попередній аналіз складу об'єктів сцени, за результатами якого з бібліотеки спектрів відбирають набір спектрів об'єктів сцени, після чого виконують перерахунок відібраних спектрів об'єктів сцени до спектральних сигнатур вказаних об'єктів на багатоспектральному аерокосмічному зображенні, за набором спектральних сигнатур об'єктів сцени проводять класифікування спектральної сигнатури кожного елемента багатоспектрального аерокосмічного зображення, за результатами класифікування обчислюють вектор апостеріорних імовірностей належності даної спектральної сигнатури кожному з об'єктів сцени, далі з використанням бібліотечних спектральних характеристик об'єктів сцени та відповідних апостеріорних імовірностей для довільного спектрального діапазону отримують відліки спектральних сигнатур всіх елементів зображення, та одержують тим самим багатоспектральне аерокосмічне зображення підвищеної спектральної розрізненності, який **відрізняється** тим, що отримання відліків спектральних сигнатур об'єктів сцени здійснюють за допомогою спектральних бібліотек та виконують в ковзному спектральному вікні з попередньо вибраною шириною та кроком зміщення вікна, які обмежуються лише спектральною розрізненністю спектральної бібліотеки, що використовується.

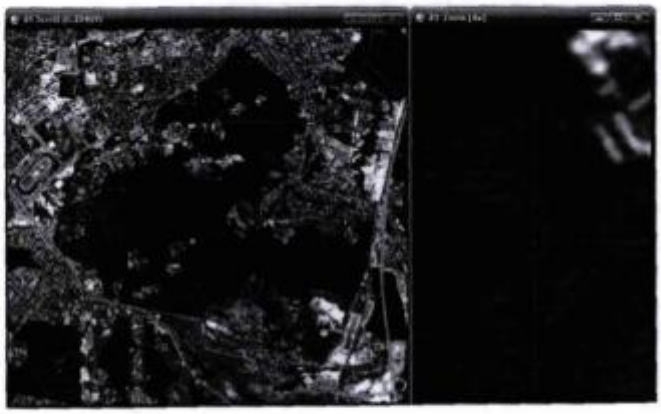


Послідовність виконання дій для підвищення спектральної розрізненності багатоспектрального аерокосмічного знімка

Фіг. 1



а)



б)

Результат використання способу підвищення спектральної розрізненності

Фіг. 2

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток Г

Довідки про впровадження результатів дисертаційного дослідження

МІНІСТЕРСТВО ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ПРИРОДНИЙ ПАРК „ГОЛОСІЇВСЬКИЙ"

03035 м. Київ, вул. Митрополита В. Липківського, 35, корпус 1 Тел./факс: (044) 221-02-72
E-mail:golospark@ukr.net

ДОВІДКА

Видана Пєстовій Ірині Олександрівні про те, що наукові положення та результати її дисертаційного дослідження на тему «Методика оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багато спектральних космічних знімків», а саме:

- оцінювання якісного стану рослинності за багатоспектральними супутниковими знімками та наземними завірковими даними, на прикладі НПП «Голосіївський»;
- алгоритм оцінки кількості рослинності урбанізованих територій на основі побудови робастної регресії та використанні індексу листової поверхні

були апробовані та використовуються науковим та рекреаційним відділами Національного природного парку «Голосіївський» при оцінюванні загального екологічного стану території, стану рослинності, моніторингу змін екосистем під впливом рекреаційних навантажень та інших дослідженнях.

Матеріали дисертаційного дослідження носять науковий характер і впроваджуються у наукову діяльність НПП «Голосіївський».

Заступник директора –
головний природознавець **Мельничук Т.В.**

Заступник директора з рекреації –
начальник рекреаційного відділу Година О.О.

Заступник директора з
науково-дослідної роботи, к.б.н. Прядко О.І.

ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКЕ ОБЛАСНЕ УПРАВЛІННЯ ЛІСОВОГО ТА МИСЛИВСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДНІПРОПЕТРОВСЬКЕ ЛІСОВЕ ГОСПОДАРСТВО»
49100 м. Дніпропетровськ вул. Космічна, 35 тел/факс (0562)68-50-76 e-mail: dp_dlg@i.ua

АКТ
впровадження результатів наукових досліджень аспірантки Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України
Пєстової Ірини Олександрівни

Наукові положення і результати, одержані І.О. Пєстовою, а саме:

- методика комплексного автоматизованого оцінювання стану рослинності з використанням космічних знімків;
- алгоритми дистанційного оцінювання якості рослинності на основі апроксимації спектрального відбиття в області червоного краю

були використані при оцінюванні екологічного стану, здійсненні моніторингу лісів Дніпропетровщини та при плануванні науково-дослідної роботи "Екологічний та енергетичний потенціал головних лісотвірнх порід Степового Придніпров'я України".

Директор **Г.П. Думинський**

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДНІПРОПЕТРОВСЬКЕ ЛІСОВЕ ГОСПОДАРСТВО» №00991686 Україна, м. Дніпропетровськ