#### Національна академія наук України Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України (ЦАКДЗ) 01601, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 55-Б тел. 486-94-05, 482-01-66 факс: 486-94-05, 482-01-66 e-mail: casre@casre.kiev.ua

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор ЦАКДЗ ІГН НАН України академік НАН України

В.І. Лялько

"15" грудня 2016 р.

### **ЗАКЛЮЧНИЙ ЗВІТ** ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

#### МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ БІОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛІСОВИХ РОСЛИННИХ УГРУПОВАНЬ ТА АГРОФІТОЦЕНОЗІВ В МЕЖАХ РІЗНИХ ЛАНДШАФТНО-КЛІМАТИЧНИХ ЗОН ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Науковий керівник НДР директор ЦАКДЗ ІГН НАН України академік НАН України

В.І. Лялько

Київ 2016

## СПИСОК АВТОРІВ

Директор Центру академік НАН України, д-р	В.І. Лялько
геолмін. наук,	
Заступник директора Центру з наукової	М.О. Попов
роботи, д-р техн. наук, науковий керівник	
теми	
Завідувач лабораторії	О.І. Сахацький
д-р геол. наук	
Головний науковий співробітник	С.А. Станкевич
д-р техн. наук	
Старший науковий співробітник	А.О. Козлова
канд. техн. наук	
Старший науковий співробітник	Г.М. Жолобак
канд. біол. наук	
Науковий співробітник	Д.М. Мовчан
канд. геол. наук	
Молодший науковий співробітник	О.А. Апостолов
Головний приладист	С.С. Дугін
Молодший науковий співробітник	І.О. Пєстова
Молодший науковий співробітник	І.Д. Сємко
Інженер	М.С. Лубський
Інженер	Г.Б. Крилова
Пров. інженер	М.В. Ваколюк
Інженер	І.Ф. Романчук
Інженер	Г.П. Оленович
Інженер	М.О. Свіденюк

#### РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 134 сторінки, 70 рисунків, 32 таблиці, 242 бібліографічні посилання.

### МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ БІОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛІСОВИХ РОСЛИННИХ УГРУПОВАНЬ ТА АГРОФІТОЦЕНОЗІВ В МЕЖАХ РІЗНИХ ЛАНДШАФТНО-КЛІМАТИЧНИХ ЗОН ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Мета роботи - підвищення інформативності багатоспектрального космічного знімання за рахунок визначення фізичних характеристик земної поверхні та біофізичних характеристик рослинних угруповань на ній.

Робота виконана на замовлення Президії НАН України та в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2013-2016 рр.

У загальному звіті представлено основні наукові результати, отримані в рамках виконання проекту на протязі чотирьох років.

Проведено аналіз стану досліджень та обгрунтування методів оцінювання біофізичних параметрів рослинних угруповань на основі оброблення даних дистанційних вимірювань та спостережень. Розглянуто особливості дистанційного оцінювання основних біофізичних праметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів. Розроблено метод оцінювання індексу листкової поверхні (LAI) та біомаси- біофізичних параметрів, які характеризують кількість та стан лісових рослинних угруповань, на основі даних LiDAR та польових вимірювань. Розроблено метод оцінювання LAI на основі багатоспектральних космічних знімків середньої просторової розрізненності та польових вимірювань. Запропоновано метод оцінювання продуктивності основних сільгоспкультур агроценозів та зволоження земного покриття в різних ландшафтно-кліматичних зонах України за наземними та супутниковими даними на основі продуктів MODIS (MOD17). Розроблено алгоритми визначення температури та спектральних коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні за матеріалами інфрачервоного знімання. Проведено валідацію методів дистанційного оцінювання біофізичних параметрів рослинності та фізичних характеристик земної поверхні.

Основна частина звіту складається зі вступу, 10<sup>х</sup> розділів, висновків.

БІОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ, КОСМІЧНІ ЗНІМКИ, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ, ЛІСОВІ РОСЛИННІ УГРУПОВАННЯБ АГРОФІТОЦЕНОЗИ, ЛАНДШАФТНО-КЛІМАТИЧНІ ЗОНИ УКРАЇНИ, РЕГРЕСІЙНІ МОДЕЛІ, ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ІНФРАЧЕРВОНИЙ ДІАПАЗОН

Сп	исок авторів	2
Ped	bepar	3
Bcı	гуп	6
1.	Сучасний стан оцінювання та прогнозування стану лісових рослинних угруповань	
	та агрофітоценозів	7
2.	Основні біофізичні параметри лісових рослинних угруповань та методи їхнього	
	дистанційного оцінювання.	8
	2.1. Висота деревостанів, ярусність, частка вегетаційного покриву (fVC),	
	3D-структура лісу	9
	2.2. Індекс листкової поверхні (Leaf Area Index)	13
	2.2.1. Визначення LAI за багатоспектральними даними супутникової зйомки.	13
	2.2.2. Визначення LAI з використанням даних LiDAR	15
	2.2.3. Особливості проведення польових завіркових досліджень	15
	2.3. Частка поглиненої фотосинтетично активної радіації (fPAR)	17
	2.4. Продуктивність рослинного покриву	19
	2.5. Фенологічні метрики. Обґрунтування вибору супутникових знімків для	
	оцінювання фенологічної динаміки лісових угруповань	22
3.	Основні біофізичні параметри агрофітоценозів та методи їхнього дистанційного	
	оцінювання	27
	3.1. Біофізичні параметри, що характеризують водообмін у рослинному та	
	ґрунтовому покриві в межах агрофітоценозів	27
	3.1.1. Вміст води в рослинах	27
	3.1.2. Транспірація	28
	3.1.3. Вологість ґрунту	37
	3.2. Вибір основних параметрів, стосовно водообміну в рослинному та	
	грунтовому покриві в межах агрофітоценозів, що можуть бути визначені на	
	основі даних ДЗЗ	39
	3.2.1. Визначення температури	39
	3.2.2. Визначення евапотранспірації	40
	3.2.3. Оцінювання вологості земного покриття за даними активного	
	мікрохвильового зондування	42
	3.2.4. Використання вегетаційних та водних індексів для оцінки вмісту	
	вологи земних покривів	42
	3.3. Дистанційна індикація гетерогенності рослинного покриву	48
4.	Розробка методу оцінювання індексу листкової поверхні (LAI) та біомаси-	
	біофізичних параметрів, які характеризують кількість та стан лісових рослинних	
	угруповань, на основі даних LiDAR та польових вимірювань	55
5.	Розробка методу оцінювання LAI на основі багатоспектральних космічних знімків	
	середньої просторової розрізненності та польових вимірювань	62
6.	Оцінювання продуктивності основних сільгоспкультур агроценозів в різних	
	ландшафтно-кліматичних зонах України за наземними та супутниковими даними	
	на основі продуктів MODIS (MOD17)	64

### **3MICT**

7. Оцінювання зволоження земного покриття на основі продуктів MODIS (MOD11 та MOD13) для різних ландшафтно-кліматичних зон України, в першу чергу, півленних регіонів (степова зона)	71
8. Розробка алгоритмів визначення температури та спектральних коефіцієнтів	/ 1
теплового випромінювання земної поверхні за матеріалами інфрачервоного	
знімання	79
9. Валідація методів дистанційного оцінювання біофізичних параметрів рослинності	
при оцінках впливу атмосферного аерозолю на стан природного середовища	81
9.1. Метод оцінки валової продуктивності рослинного покриву	
агрофітоценозів	81
9.2. Метод оцінювання індексу листкової поверхні (LAI)	88
10. Валідація методів дистанційного оцінювання фізичних характеристик земної	
поверхні при оцінках впливу атмосферного аерозолю на стан природного	
середовища	93
10.1. Метод оцінки зволоження земного покриву	93
10.2. Алгоритм визначення температури земних поверхонь та коефіцієнтів	
теплового випромінювання	99
Висновки	116
Перелік посилань	119

#### ВСТУП

Надійне та достовірне вирішення природоресурсних задач із застосуванням даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) неможливо без точного визначення біофізичних параметрів земних утворень, що підлягають дослідженням. Й найбільш важливим видом таких утворень в більшості задач є рослинні угруповання (фітоценози).

Визначення таких біофізичних параметрів, як листковий індекс, загальна біомаса, вміст вологи в рослинному покриві, чиста первинна продуктивність, концентрація хлорофілу та інших пігментів тощо, необхідне при контролюванні екологічного стану заповідних територій, оцінюванні біорізноманіття та динаміки екосистем, прогнозуванні врожайності сільськогосподарських культур, плануванні заходів з природокористування та багатьох інших. Залучення методів ДЗЗ та новітніх геоінформаційних технологій на їх основі дозволить суттєво підвищити ефективність та наукову обґрунтованість управлінських рішень в зазначених галузях.

Тому актуальним і доцільним є проведення досліджень з розробки моделей, методів і алгоритмів дистанційного оцінювання біофізичних параметрів фітоценозів та їх верифікації на спеціально визначених тестових ділянках полігонів ДЗЗ, розташованих в різних ландшафтно-кліматичних зонах України.

Методи визначення біофізичних параметрів за дистанційними даними, які існують на даний час у світі можуть бути значно покращені, якщо враховуватимуть специфічні особливості рослинного покриву України в різних ландшафтно-кліматичних зонах, а саме: розподіл основних груп природної рослинності, стуктуру посівних площ, строки вегетації, агротехнічні заходи при вирощуванні різних сільськоогогосподарських культур, багаторічні статистичні дані наземних полігонних вимірів. Крім того, слід залучати дані надійної класифікації супутникових знімків земного покриття для коректного зіставлення дистанційної та наземної інформації в межах полігонів досліджень.

На основі розроблених методів і алгоритмів в подальшому можуть бути побудовані автоматичні або автоматизовані сервіси обробки супутникових даних для різних тематичних задач ДЗЗ.

## 1. Сучасний стан оцінювання та прогнозування стану лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів

Сьогодні ліси країни відіграють важливу роль в процесі поглинання лісами вуглекислого газу, така тенденція продовжуватиметься й в майбутньому, за умови не зменшення площ лісових насаджень. Непрогнозовані екстремальні погодні явища (буревії, стихійні пожежі) та антропогенні (наприклад зниження рівня ґрунтових вод), призведе до деградації лісових екосистем. Нижче розглянемо прогнози зміни клімату та її вплив на накопичення вуглецю, на основі результатів прогнозних оцінок науковців під керівництвом Бунь Р.А. [1].

Прогнозні оцінки зміни кліматичних факторів вказують на ріст температури, зміну характеру опадів, збільшення частоти екстремальних явищ. Так за результатами досліджень завідувача відділу синоптичної метеорології Українського науково-дослідного метеорологічного інституту НАН України кандидата географічних наук Балабух Віри Олексіївни [2] до середини XXI ст., середня, максимальна та мінімальна за місяць та рік температура в Україні збільшиться. Підвищення температури призведе до зміни термічного режиму: на 2-3 тижні збільшиться тривалість теплого, безморозного періоду, зросте число днів з температурою вище 20 і  $25^{\circ}$ С; до середини XXI ст., можливе зменшення на 10 – 15 днів періоду з морозами - 10°С і нижче, яке буде найбільш суттєвим на півночі регіону, та буде спостерігатися зменшення на 5 – 10 днів з морозами - 15°С і нижче, та на 1 - Здні з морозами -20°С і нижче. Це призведе до зменшення тривалості зими та її суворості. Зміна середньої річної температури повітря на 1°С призведе до збільшення температури.

Також відбудуться зміни у режимі зволоження [2, 3]. При несуттєвій зміні річної кількості опадів, зміниться їх внутрішньорічний розподіл та структура. На всій території країни можливе збільшення майже на 20% опадів взимку, ріст максимальної за рік кількості днів з сильними та дуже сильними опадами, та збільшення їх інтенсивність. Найбільший ріст інтенсивності опадів спостерігатиметься влітку, особливо у липні. Зменшення опадів у теплий період року на фоні підвищення температури повітря, зумовить дефіцит вологи, особливо на півдні регіону. До середини XXI ст., на півночі України можливе зменшення середньої та максимальної швидкості вітру, за винятком теплого періоду.

Також за даними [2, 3] спостерігатиметься збільшення екстремальних погодних умов, а саме: зменшення числа днів з морозом і з дуже низькими нічними температурами, збільшення кількості жарких днів, хвиль тепла, кількості днів із сильними і дуже сильними опадами, які відзначилися в регіоні з кінця XX ст., дуже ймовірно, будуть спостерігатися і в середині XXI ст..

Перелічені, кліматичні зміни матимуть вплив на ріст та розвиток лісового покриву. Так проведені професором Швиденко А.З. [4] порівняння сьогоднішніх показників клімату (за період 1950-2000 рр.) і прогнозу кліматичних показників до 2020 р., отриманих за допомогою моделі НАДСМЗ (МГЕЗК сценарій А2А) дозволили зробити такі висновки для України [3,4]:

- значно зросте температура по всій країні, особливо в південній частині. Середньорічна температура збільшитися на 20% (від 7,5 °C до 9,0 °C). Подібний тренд очікується для сумарних денних температур у вегетаційний період (квітень-вересень).

- загальна кількість опадів зменшиться як у середньому за рік, так і у вегетаційний період, особливо в південній частині країни;

- ареали зростання деяких порід будуть змінені через зміни меж природних зон, в деяких випадках окремі продуктивні види повністю зникнуть;

- зміниться режими, типи, інтенсивність і частота впливу на ліс різних пошкоджуючи чинників — комах, хвороб, пожеж та ін.;

- відбудуться зміни в балансі поживних елементів.

- відбудуться (переважно негативні) зміни в стабільності і життєвості лісових екосистем, продуктивності лісових деревних і не деревних рослин.

- зміниться ефективність екологічного функціонування лісових екосистем, зокрема, їх вплив на біогеохімічних цикли, біорізноманіття тощо. При реалізації сценаріїв швидкого зростання лісу з накопичувачів вуглецю перетворяться на джерела викидів.

- зміняться цикли репродуктивності лісових порід, динаміка сукцесій, відбудуться зміни екологічних і соціальних функцій лісів.

У зв'язку з тим, що Україна знаходиться в п'яти різних природних зонах, та характеризується різноманіттям екосистем, зміни клімату можуть по різному проявлятися в різних природних зонах та на субрегіональному рівні [5]. Необхідно досліджувати впливи на регіональному рівні. Так, враховуючи показники зміни кліматичних величин, величину концентрації  $CO_2$  в атмосферному повітрі, науковцями з Львівської політехніки – Бунь Р.А., Густі М.І. та ін., було проведено оцінку вуглецевого балансу для різних екосистем та лісів Карпатського регіону [1].

# 2. Основні біофізичні параметри лісових рослинних угруповань та методи їхнього дистанційного оцінювання

Усі показники, які характеризують рослинні об'єкти і можуть бути визначені дистанційно, можна поділити за наступними основними категоріями:

- *морфоструктурні* – показники, які надають уявлення про розмір, будову, склад і структуру рослинного об'єкта;

- *біофізичні* показники, які відображають фізичні процеси, що відбуваються в об'єкті в ході індивідуального розвитку, або є наслідком його реакції на зовнішній вплив;

- біохімічні показники, які вказують на вміст певних речовин або пігментів.

Окремо з біофізичних показників варто виділити групу *фенологічних метрик*, які характеризують сезонний розвиток рослинних об'єктів.

Дистанційні показники, які використовують у дослідженнях рослинності найчастіше, наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Основні показники рослинних об'єктів, що можуть бути визначені дистанційно

Категорія	Показник					
	Видовий склад (Species Composition) [6];					
Морфоструктурні	Видове різноманіття (Species Diversity) [7];					
	Проективне покриття (Vegetation Cover) [8];					

Частка проективного покриття (Fraction of Vegetation Cover) [9, 10];
Структура пологу (Canopy Structure) [11-12];
Індекс листкової поверхні (Leaf Area Index – LAI) [14];
Біомаса (Biomass) [15-17].

Продовження таблиці 2.1 Чиста первинна продуктивність (Net Primary Productivity – NPP) [18-20]; Валова первинна продуктивність (Gross Primary Productivity – GPP) [21]; Частка фотосинтетично активної радіації (Fraction of Photosynthetically Active Біофізичні Radiation - fPAR) [22]; Евапотранспірація (Evapotranspiration) [23-26]; Вологовміст (Water Content) [27-29]. Початок вегетаційного періоду (Start-of-Season - SOS) [30]; Фенологічні Закінчення вегетаційного періоду (End-of-Season – EOS) [30]; Тривалість вегетаційного періоду (Growing Season Length - GSL) [31]. Вміст хлорофілу Chl-a, Chl-b (Chlorophylls Chl-a, Chl-b) [32-36]; Вміст каротиноїдів, антоціанів [32-36]; Біохімічні Вміст вуглецю (целюлоза, лігнін) [33]; Вміст азоту [33, 34].

Більшість представлених показників усіх категорій обчислюється на основі багатоспектральних космічних знімків. Методи лазерної локації є потужним інструментом із визначення морфоструктурних показників як окремих дерев, так і деревних рослинних угруповань. Детальний розгляд методів дистанційного оцінювання рослинних об'єктів наведено нижче.

# 2.1. Висота деревостанів, ярусність, частка вегетаційного покриву (fVC), 3D-структура лісу

Сьогодні як ніколи раніше зрозуміло, що екологічна та техногенна безпека напряму залежить від стану лісових покровів. Сучасні вимоги до ведення лісового господарства повинні ґрунтуватися на усвідомленні того факту, що воно має здійснюватися з метою задоволення різноманітних матеріальних та духовних потреб теперішніх і майбутніх поколінь без зниження еколого-економічного потенціалу лісів. Для цього необхідно спиратись на достовірний матеріал про стан лісових насаджень. Таким чином, для отримання точної та оперативної інформації про ліси, фахівці з лісового господарства все частіше звертаються до методів, основаних на сучасних технологіях дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [37-41]. Спостереження за лісовими масивами на основі матеріалів ДЗЗ дозволяє створювати різноманітні тематичні карти, у тому числі як основу геоінформаційних систем (ГІС) лісогосподарського призначення.

Аналіз деревостану на рівні найменшої структурної одиниці, (тобто, одного дерева) є важливим питанням для ведення точного лісового господарства. Виокремлення окремих дерев забезпечує поліпшену видову класифікацію шляхом аналізу спектральних даних в кожній кроні [42]. Крім того, визначення розмірів крони, може бути використане, як математична змінна для моделювання структурних та алометричних рівнянь корисних в інвентаризації та таксації лісів [39-42].

Виокремлення одного дерева здобуло широкий інтерес в середині 1990-х років та проводилось вручну на основі фотограмметричних способів з використанням аерофотознімків і стереоскопії (стереопар). У зв'язку з великими зусиллями, які необхідні для визначення позиції і кордони кожної крони, на основі ручного візуального спостереження, виникло питання про створення алгоритмів автоматичного розмежування крон.

На рис. 2.1 вказано два найбільш придатних типи даних дистанційного зондування для використання в якості основи для виявлення одного дерева. Це багатоспектральні зображення та лазерні дані. Рисунок 2.1 не включає в себе всі можливі аспекти, які можуть бути використані в існуючих підходах для виявлення окремого дерева, та служить, лише, для огляду загальних характеристик.



Рисунок 2.1. Методи автоматичного виявлення одного дерева за даними ДЗЗ

Використання багатоспектральних аерофотознімків для визначення положення кожного дерева в масиві в більшості випадків полягає у визначені локальних максимумів інтенсивності. В ідеальних випадках ці максимуми будуть означати початок крони (тобто, найвищу точку крони - пік), яка освітлюється сонячним світлом. Багатоспектральні зображення складається мінімум з трьох спектральних діапазонів. Існують різні методи, щоб обмежити їх кількість до одного найбільш інформативного каналу, який служить основою для ідентифікації максимумів. Виявлення крон дерев при використані аерофотознімків можливо тільки тоді, коли не буде перекриттів та пригнічених крон (домінуючі крони в верхньому ярусі лісу) та які взагалі не можливо виявити – середній і нижній рівень зелених насаджень (підлісок). Також, пасивний принцип формування зображення, який закладений в конструкцію більшості відомих сучасних технічних засобів багато - та гіперспектрального знімання, суттєво обмежує можливості отримання оцінок розподілу характеристик і параметрів об'єктів на різних відстанях (висотах, ярусах). Одержання означеної величини можливо із застосуванням активних лазернолокаційних (ЛЛ, лідарних) систем, в яких зображення розташованих на місцевості об'єктів формуються енергією імпульсів лазерного випромінювання, відбитого від цих об'єктів [43, 44]. ЛЛ дані, можна розглядати не тільки як растрове зображення, а як векторну хмару точок з атрибутивною інформацією про висоту, інтенсивність (силу відбиття), номер повернення, та інші, в залежності від технічних характеристик сканера.

Оброблення ЛЛ даних проводиться двома різними шляхами: перший спосіб полягає в отриманні центральної моделі місцевості (ЦММ) із хмари точок [45]. В даному випадку ЦММ використовується таким же чином, як і спектральна яскравість зображення, але має перевагу при класифікації градацій сірого, тому що кожен піксель вказує на реальну висоту, а не спектральну яскравість.

Другий спосіб полягає в більш детальному аналізі хмари точок, тобто розгляд «лазерного портрета» у трьохвимірному просторі, що дозволяє отримати об'ємні показники окремого дерева, а не тільки морфоструктурні показники плато [46].

На рис. 2.1 зображено можливість виявлення окремого дерева з описом границь крони із багатоспектральних зображень [43, 44], та з лазерних даних [45-48]. У більшості випадках розмежування крони дерев та визначення їх меж проводиться з використанням двовимірного опису об'єкта (2D) на аерофотознімках [43, 44] та ЛЛ даних [45-48]. Також для лідара можливо застосувати двох з половиною вимірний (2.5D) та трьохвимірний (3D) опис об'єкта [49]. Представлення об'єкта у 2.5D, в якому третій вимір зводиться до простого відношення двох горизонтальних просторових вимірів, таким чином, Z є функцією від X та Y. Кожна точка може мати тільки одне значення Z, таким чином третій вимір часто використовується для представлення атрибутивного значення, а не просторової координати. Прикладом представлення таких вимірів цифрові моделі (рис. 2.2). На відміну від 3D - моделі, 2.5D модель мають тільки одне значення висоти, яке може бути виділене для кожного горизонтального положення. На рис. 2.2 показано ілюстрацію для обох варіантів.



в) нЦММ

Рисунок 2.2. Цифрові моделі: а) «істинної землі» або рельєфу; б) поверхні рослинного покриву; нормалізована висота рослинного покриву

На сьогоднішній день є багато алгоритмів для автоматичного виявлення дерев за даними лідара:

Алгоритм 1: формування кластера з використанням підходу К-середніх. Щоб мінімізувати відхилення в середині кластера, в якості початкового пункту, алгоритм, використовує локальні максимуми. В процесі кластеризації у відповідних точках локальних максимумів використовується фактор зниження висоти [50].

Алгоритм 2: моделювання вокселів одного дерева на основі необроблених імпульсів лазера. Воксел (від англ. Volume – об'єм та pixel – піксел) — елемент просторового зображення, з якого складається растр у трьохвимірному просторі (аналогічний пікселю, у двовимірних зображеннях) [51].

Алгоритм 3: Адаптованої сегментації. Може бути використаний при первинній оцінці щільності плато або інтервалів між деревами, а також виявити дерева в межах ділянки, які відрізняються по характеристикам (сухостої, хворі дерева, хвойне дерево серед листяних та навпаки) [52].

Алгоритм 4: Метод локальних максимумів з регулюванням надлишку висоти шляхом зміни кількості згладжування, тобто спочатку шляхом зміни рівня інтерполяції для початкової фільтрації в ЛЛ даних, а по-друге, зміною значення гауссівського фільтра 3 × 3. Таке згладжування найбільш дієве для кожного набору даних [53].

Алгоритм 5: Сегментація на основі моделювання геометрії крони. Цей метод заснований на гауссівському згладжуванні кореляційної поверхні, яка розраховується з урахуванням геометричної моделі і з значенням висоти плато [54].

Алгоритм 6: Адаптивна фільтрація на основі значення висоти плато. Модель висоти плато за допомогою цього методу створюється на основі інтерполяції в сітці з кроком 0,5 м, приймаючи максимальне значення висоти в даній чарунці [55, 56].

Об'ємні показники дерев визначаються за допомогою лазерно-локаційними даними («лазерним портретам»), з інтегрованими багато спектральними цифровими фотознімками, на основі цифрової моделі місцевості і поля розподілу лісової рослинності, які генеруються з вихідних даних лазерної локації способом фільтрації імпульсів локатора [57]. При обробці і аналізі лазерно-локаційних даних використовуються методи математичної морфології, що оперує поняттями теорії множин і нечітких множин [58].

Висота і щільність лісового пологу використовуються як змінні при різних дослідженнях навколишнього середовища. До таких досліджень можна віднести оцінку біомаси, екстента і стану лісу, а також вивчення біорізноманіття. Щільність лісового пологу - це відношення рослинного пологу до відкритої поверхні землі при перегляді з повітря. Висота лісового пологу означає, на якій висоті знаходяться крони дерев. Лідар може бути використаний для визначення обох цих змінних [59, 60]. Горизонтальна та вертикальна характеристики лісостанів (ярусність) визначають за кількістю відбитих імпульсів від рослинних об'єктів на різній висоті по відношенню до грунту [61].

Діаметр стовбура на рівні грудей (DBH) за даними ЛЛ тісно корелюються з наземними звірками [61], і визначається за формулою (3.1):

 $DBH = a_0 + a_1H + a_2\log D + a_3\log L,$ 

де а – коефіцієнт регресії, Н – висота деревостану, D– діаметр крони, L– довжина крони.

(3.1)

Метод лазерної локації, дозволяють виконувати попіксельну інструментальновимірювальну таксацію, реконструювати ряди розподілу деревостанів за основними морфоструктурними показниками, обчислювати шукані морфоструктурні ознаки та біомасу в автоматичному режимі з високою точністю і ефективністю, на досить великих площах [57, 62].

Для оцінки біомаси лісу лідарні дані можуть бути використані на встановлені базових закономірностей досліджуваного об'єкта і визначення співвідношеня між кількістю, висотою та діаметром стовбурів і крон, які, в свою чергу, складають 87-99% загальної маси (стовбурів дерев, скелета крон і хвої). Об'ємні і вагові показники дерев з досить високою точністю апроксимуються аллометричними функціями через їх морфоструктурні ознаки - горизонтальну і вертикальну протяжність крон, діаметри стовбурів і висоту дерев [38, 62, 63].

У світовій практиці для оцінки LAI, все частіше звертаються до лазерного сканування ділянок земної поверхні з борта літака [64, 65]. LAI за даними лідара оцінується або шляхом статистичного аналізу картини лісового пологу [66] або за допомогою методів регресійного аналізу [67].

#### 2.2. Індекс листкової поверхні (Leaf Area Index)

Одним з основних показників активності процесів фотосинтезу рослинністю є індекс листкової поверхні (Leaf Area Index - LAI). Він був введений Д. Дж. Ватсоном ще у середині минулого століття [68] для кількісного оцінювання фотосинтезуючої здатності листя і виявився за своєю інформативністю і об'єктивністю одним з найбільш цінних морфоструктурних параметрів рослинних екосистем. Сьогодні індекс LAI широко використовується при вивченні особливостей взаємодії рослинності з атмосферою, в моделях вуглецевого циклу, при оцінюванні продуктивності лісів, розрахунках фітомаси, тощо [69-71].

Індекс листкової поверхні LAI характеризує просторовий розподіл рослинних елементів та визначається кількісно як відношення площі загальної поверхні освітлених листків до одиниці поверхні ґрунту для листяних культур:

$$LAI = S/G \tag{3.2}$$

де S - площа освітлених листків, G – площа грунту.

Для хвойних культур з голкоподібним листям індекс листкової поверхні визначається як відношення спроектованої площі хвойних голок до одиниці площі хвойного покриву [22, 72].

Формально LAI - величина безрозмірна, але з фізичної точки зору вона вимірюється як м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>. Для отримання величини індексу LAI рослинності існує багато різних методів, які поділяють на дистанційні за багатоспектральними даними супутникової зйомки та з використанням даних LiDAR та наземні [73, 74].

#### 2.2.1. Визначення LAI за багатоспектральними даними супутникової зйомки

В основі застосування методів дистанційного оцінювання LAI 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 так званих вегетаційних індексів, показників що розраховуються в результаті операцій з різними спектральними діапазонами (каналами) цих зображень. Найбільш часто з цією метою використовують [37, 75]:

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$
(2.1)

та Enhanced Vegetation Index (EVI):

$$EVI = G \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C_1 \times RED - C_2 \times Blue + L)}$$
(2.2)

Загальна схема отримання дистанційної оцінки LAI через вегетаційні індекси базується на побудові формули регресії. Так, проведене дослідження на знімках Landsat-5 [76], показало, що значення NDVI і LAI добре корелюють між собою, а цей статистичний зв'язок може бути із задовільною точністю описаний формулою лінійної регресії (рис. 2.3).



Рисунок 2.3. Регресійна залежність LAI(NDVI)

В роботі [77] встановлено, що точність оцінок LAI у деяких випадках може бути покращена, якщо розраховувати LAI через індекс RSR. Однак нещодавно було показано [78], 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 (рис. 2.4).



#### Рисунок 2.4. Карта глобального розподілу LAI

Для розрахунків LAI в програмних продуктах Terra та MODIS [78] багато років застосовується індекс EVI, 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 [79, 80], досягається підвищення точності оцінок LAI.

Таким чином, на сьогодні розроблено достатньо багато методів дистанційного оцінювання LAI із застосуванням багатоспектральних та гіперспектральних аерокосмічних знімків. Однак всім ним притаманні два такі недоліки: 1) більшість багатоспектральних і гіперспектральних аерокосмічних знімків, на які орієнтуються відомі методи дистанційного оцінювання LAI, мають відносно невисоку просторову розрізнювальну здатність; 2) всі оцінки LAI базуються на сигналах, відбитих лише верхнім шаром рослинності, тобто в розрахунках ніяк не враховується тривимірність рослинних об'єктів.

#### 2.2.2. Визначення LAI з використанням даних LiDAR

У світовій практиці для отримання кількісних характеристик рослинності, зокрема LAI, все частіше звертаються до такого активного засобу ДЗЗ, як лазерне сканування ділянок земної поверхні з борта літака [45, 58, 65], тобто на основі зображень рослинності, які формуються за допомогою встановленого на літаку лазерно-локаційного сканера - авіаційного лідара. LAI за даними лідара оцінується або шляхом статистичного аналізу картини лісового пологу [66] або за допомогою методів регресійного аналізу [67].

У [38] запропонована методика дистанційного оцінювання індексу LAI на основі використання матеріалів авіаційної лідарної зйомки. Розрахункова частина методики базується на регресійній моделі зв'язку між значеннями індексу LAI і деривативами (похідними продуктами) від даних авіаційної лідарної зйомки. Авторами побудовано рівняння множинної регресії та наведено результати випробування запропонованої методики, які підтверджують її працездатність і достатньо високу точність.

Необхідно звернути увагу, що поки не вдалося розробити універсальний метод оцінювання індексу LAI, який би можна було застосовувати напряму для даних незалежно від типу лідара. Крім того, невід'ємним елементом кожної лідарної технології ДЗЗ оцінювання біофізичних параметрів рослинності є проведення наземних завіркових вимірювань на території дослідження. В силу цих двох чинників вирішення практично кожної задачі оцінювання LAI за даними лідарної зйомки потребує розробки додаткового науково-методичного забезпечення з урахуванням специфіки вхідних даних, властивостей об'єктів інтересу, регіональних умов і т. д.

### 2.2.3. Особливості проведення польових завіркових досліджень

Наземні методи визначення LAI поділяються на прямі, тобто контактні, що вимагають часткового пошкодження або повного знищення рослин, та непрямі, або безконтактні, які виключають безпосередню взаємодію з рослинами.

Зміст найбільш процедурно простого, але руйнівного методу прямих наземних вимірювань LAI полягає в тому, що на певній земельній ділянці з рослинністю зрізують все листя, збирають і підраховують їх загальну площу. Відношення половини підсумованої загальної площі зібраного листя до площі ділянки дає шукану величину LAI [73]. Підрахунок загальної площі листів важко провести інакше, ніж вручну, а це вимагає великих витрат часу. Тому вказана процедура орієнтована переважно на вимірювання величини LAI для невеличких 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 [81].

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 [38, 82].

Наземні безконтактні, або непрямі 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 і 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 [71, 73, 74]. Найбільш поширеними є спосіб фотографування Digital Hemispherical Photography (DHP) і спосіб аналізу рослинного пологу Plant Canopy Analysis (PCA).

Картина розподілу світла, зареєстрована методом фотографування DHP, може бути потім оброблена спеціальною комп'ютерною програмою Gap Light Analyzer (GLA), виходом якої є конкретне значення LAI (рис. 2.5).



Рисунок 2.5. Обробка знімків DHP в середовищі GLA.

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 звичайно фотокамеру закріплюють на тринозі.

Спосіб оцінювання LAI через вимірювання та аналіз рослинного пологу PCA реалізовано в аналізаторі Plant Canopy Analyzer LAI-2000 американської компанії LI-COR Inc. [83]. Теоретичним підгрунтям даного способу є відома формула, яка зв'язує величину LAI з кількістю сумарного сонячного світла, що проходить під різними кутами через прогалини у листві дерева [71].

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. 2.6).



Рисунок 2.6. 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 [83].

Таким чином, 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 [84].

#### 2.3. Частка поглиненої фотосинтетично активної радіації (fPAR)

Фотосинтетично активна радіація (PAR) – це частина сонячної енергії видимого спектрального інтервалу в діапазоні довжин хвиль 380...750 нм, яка використовується рослинами для фотосинтезу. Вона становить близько 50% сумарної енергії сонячного випромінювання [85]. Фракції фотосинтетично активної радіації (fPAR) абсорбовані

рослинністю є визначені, як фракції абсорбовані зеленими елементами рослинного покриву. FPAR можна виміряти за допомогою наземних вимірів за допомогою спеціальних пристроїв, або супутниковими вимірами на великі просторові масштаби.

Частка поглинутої фотосинтетично-активної радіації (FPAR) визначається як частка фотосинтетично-активної радіації, яка надходить на одиницю площі, що була поглинута зеленими (фотосинтетичними) органами рослин на даній площі. FPAR була визнана Глобальною системою кліматичних досліджень при ООН (Global Terrestrial Observing System (GTOS)) одним із найважливіших кліматичних параметрів, що використовується для опису клімату планети. Даний біофізичний параметр безпосередньо пов'язаний з первинною фотосинтетичною продукцією. Він широко використовується в екосистемному моделюванні оскільки має важливе значення для обміну енергією, вологою та вуглецем між земною поверхнею та атмосферою. Опади та температура є два найголовніші фактори, що визначають частку PAR, поглинуту рослинністю. Це є важливим параметром для визначення продуктивності біомаси оскільки розвиток рослинного покриву залежить від швидкості з якою сонячна енергія поглинається рослинністю. FPAR може бути виміряна наземними методами за допомогою портативних вимірювальних приладів чи за допомогою методів дистанційного зондування [86].

Поглинуту енергію PAR можна співвіднести з фотосинтетичною активністю рослинного покриву якщо проінтегрувати її значення від сходу до заходу Сонця [87].

Співвідношення між FPAR та спектральними вегетаційними індексами рослинного покриву було емпірично виведено дослідженнями [88-90]. Також подібна залежність була продемонстрована теоретично при використанні моделей радіаційного переносу різного ступеня детальності [91-94]. Оцінка FPAR вимагає інтегрування всієї спектральної поглинальної здатності в діапазоні 0,4–0,7 мкм [93], хоча для оцінки з точністю до 95%, FPAR може бути оцінена при використанні діапазону 0,589–0,685 мкм [94]. Таким чином, частка поглинутої радіації рослинним покривом у видимому червоному діапазоні наближається до значення загальної поглинутої РАR.

Залежність NDVI-FPAR в більшості випадків має лінійний характер, за виключенням покривів з високим фоновим NDVI (покрив з високим значенням LAI для підліску) [95]. Співвідношення не залежить від піксельної неоднорідності (ґрунтовий покрив, площі з рослинним покривом), а також не залежить від орієнтації та оптичних властивостей листя [94]. З іншого боку, залежність чутлива до впливу фонової підстилки та атмосферних умов. Зростання коефіцієнта відбивання ґрунту знижує NDVI і, тим самим, збільшує FPAR. Внаслідок позитивного атмосферного впливу у видимому червоному діапазоні, і негативного атмосферного впливу в ближній інфрачервоній зоні, значення NDVI на межі атмосфери завжди менше в порівнянні з його значенням на межі рослинного покриву. В [94] була запропонована проста лінійну модель залежності FPAR та NDVI:

$$FPAR = 1,164 \cdot NDVI - 0,143. \tag{2.3}$$

В [96] ця залежність була дещо модифікована:

$$FPAR = 0,8465 \cdot NDVI - 0,1083. \tag{2.4}$$

Дана модель діє за наступних умов: 1) зенітний кут Сонця менший 60°; 2) зенітний кут огляду близький до надиру або менший 30°; 3) помірна яскравість грунту чи фонової підстилаючи поверхні (NDVI близько 0,12); 4) оптична густина атмосфери менша ніж 0,65 в спектрі 0,55 мкм [96].

Залежність між FPAR та LAI є близькою до лінійної при LAI < 3, а при більших значеннях вона має асимптотичний характер і залежить від типу покриву, ґрунту та параметрів атмосфери [94].

FPAR часто виражають як функцію LAI. Польові вимірювання, проведені на різних типах культур, таких як пшениця [97], кукурудза [98], бавовник [99] та трав'яний покрив [100] показали, що сезонний хід FPAR, як функції LAI може бути виражено експоненціальною функцією на основі закону Бера [91]:

$$FPAR = FPAR_{\infty} \cdot \left[ 1 - B \cdot \exp\left( -K_{p} \cdot LAI \right) \right], \qquad (2.5)$$

де FPAR<sub>∞</sub> - асимптотична межа поглинутої PAR для безкінечно щільного покриву (FPAR<sub>∞</sub> ≈ 0,94) [99];

В – параметр, що залежить від експериментальної похибки та відхилень від модельних припущень (лежить в межах від 0,8 до 1,2);

 $K_p$  – коефіцієнт, що визначає нахил співвідношення (еквівалент коефіцієнта затухання).

Прямі вимірювання FPAR в польових умовах можуть бути доволі складними, особливо при неоднорідному покриві, наприклад в лісах. Зазвичай FPAR вимірюють методом просторового усереднення: коли безперервні вимірювання РAR використовуються для отримання довготривалої оцінки FPAR.

FPAR розраховується наступним чином [101]:

 $FPAR = \left[ (PAR_{\downarrow AC} - PAR_{\uparrow AC}) - (PAR_{\downarrow BC} - PAR_{\uparrow BC}) \right] / PAR_{\downarrow AC}, \qquad (2.6)$ 

де  $PAR_{\downarrow_{AC}}$  та  $PAR_{\uparrow_{AC}}$  – падаюча на рослинний покрив та відбита ним PAR відповідно;

РАR<sub>↓вс</sub> та РАR<sub>↑вс</sub> – відповідні характеристики для фону.

РАR що надходить на поверхню може бути виміряна безпосередньо чи отримана при вимірюванні рівня інсоляції. За умови чистого неба, співвідношення РАR та рівня інсоляції незначно коливається на рівні близько 0,48, за виключенням значних зенітних сонячних кутів чи екстремальних значень випаровування вологи [102]. Вплив аерозолів є значним лише при горизонтальній видимості менше ніж 10 км. Проте за хмарних погодних умов, оптична густина хмар в значній мірі впливає на залежність РАR – інсоляція, яка може коливатися більш ніж на 50% при низьких зенітних сонячних кутах.

#### 2.4. Продуктивність рослинного покриву

Розглядаючи продуктивність наземного рослинного покриву з екологічної точки зору, найбільший інтерес представляють такі показники як валова первинна продукція (GPP) (Gross Primary Production), чиста первинна продукція (NPP) (Net Primary Production), чиста екосистемна продукція (NEP) (Net Ecosystem Production) та чистий екосистем ний обмін (NEE) (Net Ecosystem Exchange), які вимірюються в одиницях маси сухої речовини чи вуглецю на одиницю площі. Ці показники відіграють визначальну роль в оцінці біосферної ролі наземної рослинності, зокрема лісів, в тому числі при оцінці їх внеску у вуглецевий бюджет [103].

Валова первинна продукція (GPP) є загальна кількість вуглецю що був поглинутий рослинним покривом в процесі фотосинтезу і є головним компонентом наземного

вуглецевого балансу. GPP залежить від кліматичних умов, кліматичної мінливості, порушень рослинного покриву, доступності вологи та азоту для рослин, типу грунтів, видового складу та структури рослинного покриву [104]. Оцінка впливу цих факторів на GPP досі залишається значним викликом для наукової спільноти внаслідок їх складної взаємодії та складності в безпосередньому кількісному вимірюванні GPP для різних часових та просторових масштабів. Прямі виміри GPP, що проводяться за допомогою методу вихрової коваріації, носять точковий характер і доступні лише для останніх десятиліть. Тому, для довготривалих оцінок GPP на регіональному та глобальному рівнях, а також прогнозування відповіді GPP на кліматичні зміни, найбільш ефективним залишається моделювання. Серед значної кількості існуючих моделей [105] найбільш відомими та широко використовуваними є моделі GPP що базуються на концепції фактору перетворення енергії в біомасу, відомого як ефективність використання світла (LUE) (light use efficiency) [19, 106-113] для перетворення фотосинтетично активної радіації, що надходить на поверхню і поглинається рослинністю в біомасу [103]. Загальний вигляд такої моделі можна записати як:

$$GPP = \varepsilon \cdot FPAR \cdot PAR \cdot S_{T_{min}} \cdot S_{VPD}, \qquad (2.7)$$

де GPP – валова первинна продукція (г С м-<sup>2</sup>), ε – максимальна ефективність використання світла (г С МДж<sup>-1</sup>), FPAR – частка поглинутої фотосинтетично активної радіації, PAR – фотосинтетично активна радіація (МДж м<sup>-1</sup>), <sup>S</sup><sub>Tmin</sub> – скаляр мінімальної температури, <sup>S</sup><sub>VPD</sub> - дефіцит вологості [114].

Проте розрахунок GPP є лише першим етапом. Для оцінки продуктивності лісового покриву та кругообігу вуглецю більш важливе значення має не валова (GPP), а чиста первинна продуктивність (NPP), яка в загальному вигляді може бути визначена для певного інтервалу часу  $\Delta L$  як:

$$NPP = GPP - R \tag{2.8}$$

де *R* – втрати вуглецю внаслідок дихання [115].

Однак оцінка NPP безпосередньо через GPP є досить складною, оскільки існують значні невизначеності пов'язані з оцінкою втрат вуглецю через дихання [115]. Щоб обійти ці складнощі Лансберг і Ворінг розробили модель яка припускала що співвідношення NPP/GPP є приблизно сталим і для лісів помірної зони складає приблизно 0,45. Це значення було виведене ними на основі цілого ряду опублікованих та неопублікованих даних [116]. Проте дана модель є дуже спрощеною і не може в повній мірі забезпечити наше розуміння процесів в екосистемах пов'язаних з потоками вуглецю та його накопичення в біомасі. В 90-х роках минулого століття було розроблено цілу низку більш складних моделей, які дають змогу оцінювати величину і географічний розподіл первинної продуктивності земного покриву на глобальному рівні [118]. Ці моделі характеризуються різною складністю, від простих регресійних залежностей між кліматичними чинниками та біофізичними параметрами, до квазі-механістичних моделей які описують біофізичні та екофізіологічні процеси в рослинному покриві. Кожен з цих підходів базується на спрощених припущеннях відносно структури екосистеми і як рослинний покрив може відреагувати на зміни в навколишньому середовищі. Різні моделі використовують різні спрощення і різні параметри навколишнього середовища, що приводить до різних оцінок чистої первинної продукції на глобальному рівні. Основними ж параметрами, що контролюють вуглецевий обмін між земним покривом та атмосферою є сонячна радіація та локальні умови навколишнього середовища, тобто умови при яких відбувається фотосинтез. Температура та опади є чи не найголовнішими кліматичними факторами, які контролюють здатність рослин поглинати фотосинтетично активну радіацію (PAR) і пов'язані з перетворенням атмосферного  $CO_2$  в суху речовину, тобто іншими словами чистою первинною продукцією (NPP) екосистеми. Крамер зі своїми колегами [117] поділив усі ці моделі на три групи в залежності від того чи використовують вони як вхідні дані визначенні сезонні коливання взаємодії радіації з рослинним покривом та / чи визначені розподіли рослинного покриву (табл. 2.2).

	Вхідні дані			Вихідні дані			
	Розподіл		Інші	Біогеохімічні	TAT	Розподіл	
	рослинного	FPAR	супутникові	потоки	LAI	рослинного	
	покриву		дані			покриву	
Моделі на основі супу	тникових даних						
CASA [118]	Х	Х		Х			
GLO-PEM [119]		Х	Х	Х			
SDBM [120]		Х		Х			
TURC [121]	Х	Х		Х			
SIB2 [122]	Х	Х	Х	Х			
Моделі біогеохімічни	х потоків						
HRBM [123]				Х			
CENTURY [124]	Х			Х			
TEM [125]	Х			Х			
CARAIB [126]	Х			Х	Х		
FBM [127]	Х			Х	Х		
PLAI [128]	Х			Х	Х		
SILVAN [129]	Х			Х	Х		
BIOME-BGC [130]	Х			Х	Х		
KGBM [131]	Х		Х	Х	Х		
Моделі біогеохімічни	Моделі біогеохімічних потоків та структури рослинного покриву						
BIOME3 [132]				Х	Х	Х	
DOLY [133]				Х	Х	Х	
HYBRID [134]				Х	Х	Х	

Таблиця 2.2. Розподіл моделей NPP відповідно до вхідних та вихідних даних [117]

Першу групу складають моделі ЩО використовують супутникові лані фотосинтетично активної радіації. Дані моделі можуть бути використані для оцінки впливу кліматичних факторів на NPP, хоча вони дуже обмежені відносно незначним архівом супутникових даних. До другої групи відносяться моделі біогеохімічних потоків на основі ґрунтових та кліматичних характеристик з використанням карт рослинного покриву чи біогеографічних моделей що описують структуру рослинного покриву. Такі моделі здатні описувати лише функціональні зміни в певному типі рослинного покриву а тому повністю ігнорують можливий вплив перерозподілу в рослинному покриві. Третя група моделей описує зміни як в структурі екосистем (розподіл рослинного покриву та фенологія), так і в їх функціональності (біогеохімія).

Основні параметри моделей перераховані в табл. 2.3 В загальному використовується два основні підходи для підрахунку NPP. Деякі моделі (CASA, CEMTURY, HRBM) описують NPP безпосередньо на основі характеристик рослинного покриву, факторів навколишнього середовища чи індикаторів таких як температура, опади та ін. Інші розраховують NPP як різницю між двома процесами, що моделюються незалежно один від одного: валова первинна продукція та автотрофне дихання (R<sub>a</sub>).

	NPP			
	Оцінюється як	Параметри моделі		
CASA	NPP	$NPF = f\left(R_{s}, FPAR, T_{s}\frac{AET}{PET}\right)$		
GLO-PEM	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f\left(R_{p}, FPAR, T, \frac{SW}{VPD}\right)$ $R_{p} = f\left(V_{PP}, C, CPP\right)$		
SDBM	NPP	$NPP = f(R_{s}, FPAR, CO_{s})$		
TURC	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f(R_{s}, PPAR)$ $R_{s} = f(Ver C T)$		
SIB2	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f(R_s, FPAR, LAI, T, SW, VPD, CO_2)$ $R_s = f(GPP, T, SW)$		
HRBM	NPP	$NPP = f(T, P, \frac{AET}{PBT}, CO_2, Fert)$		
CENTURY	NPP	NPP = f(Veg C, T, SW, P, PET, N, S)		
TEM	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f\left(R_s, KLeaf, T, \frac{AET}{PET}, CO_s, N\right)$ $R_s = f(Veg C, GPP, T)$		
CARAIB	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f(R_s, LAI, T, SW, VPD, CO_s, O_s)$ $R_s = f(Veg C, LAI, T)$		
FBM	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f(R_s, LAI, T, SW, CO_g)$ $R_s = f(Veg C, T)$		
PLAI	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f(R_s, LAI, T, SW, CO_g)$ $R_s = f(Veg C, T)$		
SILVAN	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f\left(R_s, LAI, T, \frac{ABT}{PBT}, CO_2\right)$ $R_s = f(Veg C, T)$		
BIOME-BGC	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f(R_{p}, LAI, T, SW, VPD, CO_{p}, Leaf N)$ $R_{p} = f(Veg C, T)$		
KGBM	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f(R_{s}, LAI, T, SW, VPD)$ $R_{s} = f(GPP)$		
BIOME3	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f\left(R_{s}, LAI, T, \frac{AET}{PET}, CO_{s}\right)$ $R_{s} = f(LAI, GPP)$		
DOLY	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f(R_s, LAI, T, SW, VPD, CO_s, Soft C \& N)$ $R_s = f(Veg C, T, Soft C \& N)$		
HYBRID	GPP – R <sub>a</sub>	$GPP = f(R_s, FFAR, T, SW, CO_2, N)$ $R_s = f(Veg C, T, Veg N)$		

Таблиця 2.3. Параметри що використовуються для оцінки NPP в різних моделях [117]

### 2.5. Фенологічні метрики. Обґрунтування вибору супутникових знімків для оцінювання фенологічної динаміки лісових угруповань

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 в кінці жовтня.

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.

Динаміка настання фенофаз, терміни початку, закінчення і тривалість фенологічних циклів у рослин знаходяться під постійним і потужним 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.

Фенологічний стан лісів враховують при їх таксації (обліку) із застосуванням даних аеро- та космічної зйомки, так як оптичні властивості лісів тісно пов'язані з їх сезонним розвитком.

В останнє десятиліття, було розроблено широкий ряд методів з метою визначення часу появи листя та листопаду (тобто початку і закінчення вегетаційного періоду), на основі часових рядів даних нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (NDVI), отриманих з сенсорів низької просторової розрізненості.

Доведено існування тісного зв'язку між вегетаційними індексами, обчисленими на основі супутникових знімків, зокрема NDVI, та кількісними характеристиками рослинності, а саме індексом листкової поверхні (LAI), зеленою біомасою та проективним покриттям. Спочатку єдиним джерелом глобальних даних для таких досліджень були матеріли зйомок сенсора AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Однак, оскільки сенсор AVHRR ніколи не був призначений для спостережень суходолу, ці дані не дуже добре підходять для моніторингу рослинності. Зокрема, відсутність точного калібрування, погана геометрична корекція, і труднощі, пов'язані з маскуванням хмар на знімках AVHRR, що призводять до збільшення рівня завад. Радіометричні й геометричні властивості сенсора MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на борту Тегта космічного корабля NASA, в поєднанні з поліпшеною атмосферною корекцією і маскуванням хмар, забезпечують істотно поліпшену основу для досліджень такого роду.

Графічне представлення часових рядів даних вегетаційного індексу NDVI утворює криву, яка узагальнює різні етапи, яких зазнає зелена рослинність протягом повного вегетаційного періоду. Такі криві можуть бути проаналізовані для виявлення ключових фенологических змінних або метрик, стосовно конкретного сезону, наприклад, початок вегетації (SOS), пік сезону (POS) і кінець сезону (EOS). Ці характеристики можуть не корелювати безпосередньо із звичайними фенологічними явищами, що реєтруються традиційними методами, проте вони дають уявлення про динаміку екосистем.

Згладжування даних полегшує аналіз часових рядів за рахунок зниження аномальних, спричинених шумом піків і спадів, які з'являються, коли значення NDVI представлені у вигляді графіку задля виявлення зміни рослинності протягом тривалого часу.

Б.С. Рид запропонував метод визначення фенологічних метрик на основі супутникових даних. Обчислені на кожен рік або вегетаційний період, ці показники є

основою для різноманітних досліджень і моніторингових спостережень, в тому числі досліджень змін клімату.

Початок вегетаційного періоду (Start-of-Season – SOS). Початок періоду, коли у полозі рослинного угруповання з'являється перше листя і вимірювання фотосинтезу стають можливими, (рис. 2.7).



Рисунок 2.7. Початок вегетаційного періоду

Закінчення вегетаційного періоду (End-of-Season – EOS). Початок періоду. Коли вимірювання фотосинтезу у рослинному покриві вже неможливі (рис. 2.8).



Рисунок 2.8. Закінчення вегетаційного періоду

*Пік вегетації* (Time of Maximum / Maximum NDVI). Період максимальної фотосинтетичної активності фітомаси рослинного покриву (рис. 2.9).



Рисунок 2.9. Пік вегетації

*Тривалість вегетаційного періоду* (Growing Season Length - GSL). Кількість днів між початком на закінченням вегетаційного періоду (рис. 2.10).



Рисунок 2.10. Тривалість вегетаційного періоду

*Амплітуда вегетаційного періоду* (Amplitude). Максимальне збільшення фотосинтетичної активності рослинного покриву від початку вегетаційного періоду (рис. 2.11).



Рисунок 2.11. Амплітуда вегетаційного періоду

Фенологічні спостереження мають велике значення і 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. 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 аналізу відбираються знімки, які задовольняють наступні умови досліджень: фенологічні фази з максимальною продуктивністю, допустимий відсоток покриття знімку хмарами.

Знімки визначаються просторовою (табл. 2.4) та часовою (табл. 2.5) розрізненністю.

r r	r - r			
Рівень	Глобальний	Регіональний	Локальний	
Просторове	Низьке	Серелнс	Високе	
розрізнення	ПИЗВКС	Середне		

Таблиця 2.4. Просторова розрізненість космічних знімків

Часове розрізнення визначається фенологічним циклом, тобто швидкістю росту. Для достовірної оцінки потрібно 3-5 точок зйомки для кожної фенофази (рис. 2.12).



Рисунок 2.12. Графік зйомок протягом року

	•	•
Таолиця 2.5. Час	ова розрізне	енність

Фенофаза	1. Кінець періоду спокою та початок сокоруху	2. Цвітіння, розпускання листків	3.Активний ріст біомаси	<ol> <li>Період максимальної продуктивності</li> </ol>	5. Спад вегетації	6. Початок періоду спокою
Період повторної зйомки (дні)	_ *	1-2	4-5	12-13	15	_ *

\* зйомка може проводитися для додаткової ідентифікації вічнозелених рослин

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.

# **3.** Основні біофізичні параметри агрофітоценозів та методи їхнього дистанційного оцінювання

# **3.1.** Біофізичні параметри, що характеризують водообмін у рослинному та грунтовому покриві в межах агрофітоценозів

Як відомо, всі фізіологічні процеси в рослині протікають нормально лише при забезпеченні їх водою, що створює умови для необхідного водообміну в системі ґрунтрослина-атмосфера. Вода не тільки розчинник, а й активний структурний компонент клітини. Вона бере участь у біологічних перетвореннях, наприклад, полегшує взаємодію між молекулами, служить субстратом для фотосинтезу, бере участь в диханні і в численних гідролітичних і синтетичних процесах. Вода має дуже високу теплоємність, тому сприяє стабілізації температури рослини. Пронизуючи всі його органи, вона створює в ньому безперервну фазу, забезпечуючи зв'язок органів один з одним, а також можливість пересування по рослині поживних речовин. Вода відіграє істотну роль у збереженні форми трав'янистих рослин, підтримуючи їх клітини в стані тургору.

Перед розглядом біофізичних параметрів, що характеризують водообмін у рослинному покриві, включаючи агрофітоценози, зазначимо, що фітомоніторинг для визначення стану рослин може проводитись на основі вимірів двох основних груп параметрів. Одна з цих груп може характеризуватись як процес, що має відповідну інтенсивність, швидкість, динаміку і т.п., а інша група складається з відносно статичних характеристик (концентрація компонентів, ємність, напруженість і т.д.). Стосовно водного режиму до першої групи параметрів, що характеризують водообмін в рослинах, очевидно, відноситься транспірація, а до другої групи показників слід відносити вміст води в рослинах (в їх вегетативних органах) та ґрунті.

#### 3.1.1. Вміст води в рослинах

Вміст води в рослинах залежить від виду та віку рослин, умов водопостачання, транспірації і певною мірою від умов мінерального живлення. Вологозабезпеченість поряд з іншими факторами зовнішнього середовища надає значний вплив на величину, якість врожаю сільськогосподарських культур і ефективність добрив.

Вміст вологи в рослинних тканинах зазвичай обчислюють у відсотках від сухої або сирої маси. При цьому абсолютно суху вагу рослинного матеріалу визначають висушуванням його до постійної ваги при 100 – 105<sup>0</sup> С.

У тканинах зростаючих вегетативних органів рослин вміст води коливається від 70 до 95%, а в тканинах насіння і в клітинах механічних тканин - від 5 до 15%. У міру старіння рослин загальний запас і відносний вміст води в тканинах, особливо репродуктивних органів, знижується.

Наведемо вміст води у вегетативних органах різних сільськогосподарських культур за Б.П. Плешковим [135] (табл. 3.1). Для порівняння в табл. 3.1 наведено вміст інших компонентів.

Культура	Вода	Білки	*Сирий протеїн	Жири	Інші. вуглеводи	Клітковина	Зола
Пшениця (зерно)	12	14	16	2,0	65	2,5	1,8
Жито (зерно)	14	12	13	2,0	68	2,3	1,6
Овес (зерно)	13	11	12	4,2	55	10,0	3,5
Ячмінь(зерно)	13	9	10	2,2	65	5,5	3,0
Рис (зерно)	11	7	8	0,8	78	0,6	0,5
Кукурудза (зерно)	15	9	10	4,7	66	2,0	1,5
Гречка (зерно)	13	9	11	2,8	62	8,8	2,0
Горох (зерно)	13	20	23	1,5	53	5,4	2,5
Фасоля (зерно)	13	18	20	1,2	58	4,0	3,0
Соя (зерно)	11	29	34	16,0	27	7,0	3,5
Соняшник (насіння)	8	22	25	50	7	5,0	3,5
Льон (насіння)	8	23	26	35	16	8,0	4,0
Картопля (клубні)	78	1,3	2,0	0,1	17	0,8	1,0
Цукровий буряк (корені)	75	1,0	1,6	0,2	19	1,4	0,8
Кормовий буряк (корені)	87	0,8	1,5	0,1	9	0,9	0,9
Морква (корені)	86	0,7	1,3	0,2	9	1,1	0,9
Лук ріпчастий	85	2,5	3,0	0,1	8	0,8	0,7
Клівер (зелена маса)	75	3,0	3,6	0,8	10	6,0	3,0
Збірні багаторічні трави (зелена маса) *Сирий протеїн вкли	70	2,1	3,0	1,2	10	10,5	2,9

Таблиця 3.1. Середній хімічний склад врожаю сільськогосподарських рослин, в % (за Б. П. Плешковим [135])

Отже ступінь вмісту вологи - важливий показник водного режиму рослин. З вмістом води пов'язані концентрація клітинного соку, водний потенціал окремих органів рослини, ставлення його до грунтової та атмосферної посухи. Зокрема, визначення вмісту води в листі дає можливість з'ясувати еколого-фізіологічні особливості рослин, розкрити механізми їх адаптації до умов середовища.

У листі більшості рослин помірних широт залежно від погодних умов і етапів онтогенезу вміст води становить 65–82 % від сирої біомаси. Різні за посухостійкості рослини відрізняються характером водного обміну. Рослини вологолюбних видів і сортів містять багато води при достатній кількості її в ґрунті. Однак вони швидко втрачають воду при зниженні вологості ґрунту. У більш стійких до посухи форм вміст вологи в рослинах, як правило, нижче, але її кількість більш стабільна.

#### 3.1.2. Транспірація

Враховуючи виняткову важливість даного процесу для життєдіяльності рослин, наведемо більш детальний опис особливостей транспірації різних типів рослин.

За даними багатьох робіт, що стосуються фізіології рослин, процес водообміну в них представляється наступним чином [136-142 та ін.]. Водообмін рослин з оточуючим середовищем, що є однією з важливих сторін життєдіяльності рослин, складається загалом з трьох процесів: 1) поглинання води, 2) переміщення і розподіл поглинутої води, 3) випаровування води або транспірація. Водообмін рослин характеризується мінливістю

протягом доби та вегетаційного періоду і перебуває у безпосередньому зв'язку із загальним обміном речовин, фізико-хімічними властивостями протоплазми та структурною організацією клітин внутрішніх та покривних тканин [140, 142 та ін.].

Для підтримки балансу необхідно, щоб випаровування рослиною води через листя компенсувалось її поглинанням через коріння. Для різних годин доби, а також в різні періоди вегетації співвідношення між витратами та надходженням води складається у рослин по різному. В більшості випадків це співвідношення складається в денні часи таким чином, що випаровування значно перевищує за інтенсивністю поглинання води Внаслідок цього в тканинах рослин виникає так званий водний дефіцит. В нічні години поглинання води корінням перевищує транспірацію і в результаті повністю компенсує водний дефіцит, або він зводиться до мінімуму. Співвідношення між поглинанням та транспірацією води залежить від багатьох факторів і у різних видів рослин воно різне [140, 142 та ін.].

Поглинання води може проходити різними шляхами. У нижчих рослин та гігрофітів, у яких покривні тканини слабо захищені кутикулами, поглинання води може проходити через всю поверхню рослини. Лишайники та мохи в процесі еволюції набули здібність періодично майже повністю висихати, а потім поглинати воду без шкоди для своєї життєдіяльності. У цих рослин значну роль відіграють повітряні корені, які ,завдяки їх особливій будові, гігроскопічні [140, 142 та ін.].

У вищих рослин органом поглинання є практично тільки корені, тоді як поглинання води листям важливої ролі не відіграє. Листя в основному забезпечує витрати води через транспірацію [140, 142 та ін.].

Побудова кореневої системи у вищих рослин та закономірності її розвитку вивчалися досить детально [140, 142 та ін.].

Встановлено, що розміри кореневої системи (число, довжина коренів та кореневих волосків, їх поверхня) пов'язані з видовими особливостями рослинного організму, а також залежать від умов його розвитку. Значно впливають на розміри кореневої системи: родючість ґрунту, забезпеченість рослини водою, вміст в ґрунті поживних речовин. Глибина проникнення коренів навіть у трав'янистих рослин може сягати декількох метрів, а у дерев значно більше [143]

Загальновизнано, що поглинання води і її піднімання вверх відбувається внаслідок дії двох факторів: кореневого тиску (нижній кінцевий двигун) та сили, що всмоктує, тобто транспірації, або верхнього кінцевого двигуна. Сила всмоктування кореневої системи – це різниця між осмотичним тиском пасоки та осмотичним тиском поживного розчину, залежить від вмісту солей в поживному середовищі [142]. Надходження води до клітин кореня продовжується до тих пір, поки існує градієнт хімічних потенціалів води в клітинах кореня та поза ним. Хімічний потенціал води в клітинах визначається, головним чином, загальним характером процесів обміну речовин, який у різних рослин проходить по-різному і змінюється протягом доби та всього онтогенезу. Взагалі процес поглинання води рослиною є енергозалежним. Зниження температури значно сповільнює цей процес до повної його зупинки [142].

Сила всмоктування коренів різна в залежності від різновиду рослин. У трав'янистих рослин вона, як правило, не перевищує 100 – 150 кПа, у деревних форм – вона досягає значно більших величин. Швидкість руху води в рослинах залежить від сили кореневого всмоктування. Але механізм руху води в рослинах вивчено ще недостатью.

Основним тут є питання природних факторів, які забезпечують підняття води по судинах на значну висоту. Вважається, що дія транспірації (верхнього кінцевого двигуна), яка вимірюється багатьма тисячами кПа, має відношення до шару води, що знаходиться безпосередньо біля клітин листя, які випаровують воду. Розповсюдження цього впливу на всю воду в капілярах судин забезпечується силами зчеплення молекул води, що досягають 20000-30000 кПа і більше. Саме поєднання сили зчеплення з дією нижнього та верхнього кінцевих двигунів і забезпечує підйом води на десятки метрів, яких досягає висота деяких дерев. Що стосується швидкості переміщення води по судинах рослин, то вона за матеріалами дослідів з поміченими атомами досягає 1-2 м за годину, а в деяких випадках і більше [144].

Об'єми переміщення води в рослинах залежить від інтенсивності транспірації – випарування води листям. Кількість води, що споживають рослини, досить значна. Наводяться приклади, коли посіви пшениці при середньому врожаї випаровують за період вегетації кількість води, що перевищує кількість опадів за цей же період [144 та ін.]. Інтенсивність транспірації забезпечується розвитком листяного апарату та площею листяної поверхні. Загальна площа поверхні листя в нормальних умовах перевищує земельну площу, що займають рослини. В табл. 3.2 наведено типову листяну поверхню деяких рослин та рослиних угруповань.

Як ми бачимо, при суттєвих відмінностях у кількості рослин на 1 га, загальна площа листяної поверхні порівняно однакова. Це пояснює, чому дані експериментальних робіт багатьох дослідників показують не надто великі відмінності у витратах на транспірацію з одиниці площі у різних груп рослин однієї кліматичної зони з порівняно однаковим вологозабезпечення.

N Рослини		Кількість рослин	Загальна площа поверхні
		(тис. шт.) на 1 га	листя, 1 а
1	Зернові злакові культури	5000	біля 8
2	Бобові трави	200	12
3	Плодові дерева в садах	0,200	2
4	Цукровий буряк, бавовник	100	5
5	Листяний ліс	3 - 5	6

Таблиця 3.2. Листяна поверхня деяких рослин та рослинних угруповань за (наведено за роботою Б.А. Рубіна [142])

Транспірація, яка в своїй основі є фізичним процесом випаровування води рослиною, в дійсності є складовою біохімічних процесів, що грає в життєдіяльності рослин важливу роль. Головне значення транспірації полягає в тому, що вона слугує засобом переміщення води і різних речовин розчинених у воді, вверх вздовж стебла. У деревних порід всмоктуюча сила транспірації набагато перевищує кореневий тиск. У трав'янистих рослин, навпаки, вона нижча, але залишається значною. Крім перенесення поживних речовин, транспірація бере участь у диханні рослин, поглинанні  $CO_2$  через його дифузію у глиб листя через спеціальні клітини листя, які мають бути зволожені водою. Нарешті транспірація є важливим засобом захисту листя рослин від перегрівання, що має важливе значення для різних біохімічних реакцій і, в першу чергу, для процесів фотосинтезу. Проведені досліди показують, що температура поверхні листя завдяки транспірації є близькою до температури навколишнього середовища, навіть у тих листків,

що знаходяться під прямими променями сонця. А при значному водозабезпеченні та транспірації температура листя, особливо в тіні, може бути нижчою за температуру повітря [142].

Зниження транспірації через недостачу вологи суттєво порушує звичайний хід фізіологічних процесів у листків. Це призводить до підвищення температури листя, порушення в колоїдній системі протоплазми, пригнічення фотосинтезу і т.п. За певними межами ці порушення призводять до патологічних наслідків і стають незворотніми, що викликає відмирання листя, а у подальшому і загибель рослини [142].

Розрізняють продихову та кутикулярну транспірацію. Продихи листя мають отвір, через який проходить транспірація. Інтенсивність продихової транспірації залежить від розміру отворів, що регулюється насиченістю спеціальних клітин водою. Чим більша насиченість – тим, як правило, більший отвір. При значній втраті води продиховий отвір закривається. У свою чергу, стан клітин продихів залежить від утримання в них осмотично активних, тургорогенних речовин.

На рух продихів в більшій міри впливають короткохвильові радіації, ніж довгохвильові, які найбільш ефективніше використовуються в процесах фотосинтезу. Таким чином, стан продихів регулюється не одним фактором, а їх складними співвідношеннями [142].

Кутикулярна транспірація здійснюється через особливі канали в кутикулі листя. Як і у випадку з отворами продихів канали кутикули використовуються не тільки для транспірації води, але і для дифузії  $CO_2$ . Кутикулярна транспірація також залежить від ряду факторів, включаючи вологість повітря, швидкість вітру, температуру листя і, особливо, від будови кутикули. Останній фактор призводить до того, що при однакових зовнішніх умовах у різних видів рослин кутикулярна транспірація має суттєво різні значення. Рослини з тонкою кутикулою характеризуються більшою інтенсивною кутикулярною транспірацією. Навіть рослини одного виду, але молодші, мають більшу кутикулярна транспірацію - до 50% від загальної кількості. У тих же зрілих рослин кутикулярна транспірація може складати тільки 10% від загальної. Вологість повітря теж має значний вплив. Так, при зміні вологості повітря від 95% до 55%, кутикулярна транспірація збільшується в 5–6 разів [239 та ін.]. Це показує, що рослина може регулювати не тільки продихову, а і кутикулярну транспірацію.

Співвідношення між продиховою та кутикулярною транспірацією залежить від багатьох умов. Але головним чином вона залежить від типу рослин. У рослин, які зустрічаються у добре зволожених місцях (гігрофіти) кутикулярна транспірація не поступається продиховій, а іноді і перевищує її. У рослин, що ростуть в умовах посушливого клімату (ксерофітів, сукулентів) кутикулярна транспірація дуже низька, або навіть зовсім відсутня [140, 142 та ін.].

Загалом на транспірацію сильно впливає інтенсивність сонячного випромінювання. Розсіяне світло збільшує транспірацію на 30 – 40 %, а прямі сонячні промені у декілька разів [142 та ін.].

Складним є також вплив температури на транспірацію. Адже при підвищенні температури відносна вологість повітря швидко знижується і при цьому зростає так звана всмоктуючи сила повітря, що інтенсифікує процес дифузії молекул води з рослини в повітря [142].

З точки зору взаємозв'язку водного та карбонового циклу особливо при дослідженнях змін клімату дуже важливим є розгляд питання зв'язку транспірації з продукціонним процесом. Дані багатьох досліджень вказують на їх тісну кореляцію – інтенсивна транспірація супроводжується, як правило, швидким накопиченням біомаси і поглинанням CO<sub>2</sub> з атмосфери [140, 142]. Адже головне значення транспірації полягає в тому, що вона слугує засобом переміщення води і різних поживних речовин, розчинених у воді, вверх вздовж стебла рослини. Фактично це - транспортуючий засіб будівельних матеріалів до ділянок побудови нових клітин в тканині рослин в результаті біохімічних процесів.

Ефективність використання води є однією з важливих біологічних властивостей рослинного організму. Цю властивість характеризують кількістю води, що витрачається рослиною на побудову кожної одиниці сухої речовини. Для цього введено показник - *коефіцієнт транспірації* – це кількість води в г, яку випаровує рослина для накопичення 1 г сухої речовини [142 та ін.].

Величина, обернена до коефіцієнта транспірації, є *продуктивність транспірації*, яка вказує на кількість грамів сухої речовини, що формується рослиною при витратах 1000 г води. Ці два показники значно змінюються в залежності від виду та сорту рослин, а також від умов їх росту. Зокрема, на продуктивність транспірації впливають умови мінерального живлення, інтенсивність освітлення, температурний режим та деякі інші фактори. Але в середньому, за даними багатьох досліджень, встановлено, що для більшості сільгоспкультур помірної кліматичної зони продуктивність транспірації складає З г (при транспіраційних витратах 1000 г води) [142 та ін.].

Отже, при витратах 1000 г води рослина синтезує в середньому 3 г сухої біомаси, в якій на долю водню та кисню води приходиться 2/3, або біля 2 г. Отже рослина використовує в побудові тканин лише 2 г води з 1000 г, що вона пропускає через себе. Решта 99,8% води випаровується завдяки транспірації [142 та ін.].

Для характеристики водних витрат рослин існують також інші показники, а саме: *інтенсивність транспірації* – кількість води, яка втрачена рослиною за одиницю часу на одиницю листяної (транспіруючої) поверхні - г/дм<sup>2</sup> год. Цей показник прямо пропорційний дефіциту насиченості повітря водяною парою, прямо залежить від температури повітря, інтенсивності освітлення, інтенсивності руху повітря, а також від ступеня вологості ґрунту і концентрації ґрунтового розчину [140, 142 та ін.]. Інтенсивність транспірації також вимірюють в мм стовпа води за одиницю часу, наприклад, мм/рік.

Важливе значення має баланс між продиховою та кутикулярною формами транспірації: чим більш низькою є кутикулярна транспірація, тим більш ксероморфною та життєстійкою є рослина в умовах посухи [140, 142 та ін.].

На інтенсивність транспірації також впливає наявність у повітрі та ґрунтах токсичних речовин органічної та неорганічної природи. При цьому хід транспірації зберігає коливальний характер, але пригнічується пропорційно концентрації діючого забруднювача [140, 142 та ін.].

Інтенсивність транспірації коливається в різні години доби. В жаркі денні годи, за даними спостережень, запаси води в листках поновлюються кожні три години. В нічні години випаровування знижене, але воно практично ніколи повністю не припиняється. Вочевидь баланс води в тканинах може підтримуватись завдяки лиш неперервній

транспірації та компенсації витрат води шляхом поглинання води з грунту [140, 142 та ін.].

Вкажемо ще на декілька показників транспіраційних витрат [145 та ін.]:

- *коефіцієнт транспіраційної активності* – відношення транспірації лісовим насадженням до маси листя (хвої) у свіжому стані, м<sup>3</sup>/(кг·рік);

- *відносна транспірація* – інтенсивність транспірації, яка визначена відносно вільної водної поверхні такого самого розміру;

- *швидкість витрати водного запасу* – кількість втраченої води за одиницю часу, у відсотках від загального вмісту води. Наприклад, тонкі, тендітні листки тіньолюбних рослин за годину можуть витрачати 39-115% води, тоді як м'язисті – 8-20%.

Особливості водообміну і транспірація в межах лісової та степової рослинності.

Розглянемо особливості водообміну в межах лісових рослинних угруповань. Ліс – це рослинне угрупування, де переважають деревні види. Його структура у порівнянні з трав'янистим рослинним угрупованням значно складніша.

В лісі виділяється кілька ярусів: дерева першої величини, дерева другої та третьої величини, підлісок з кущів, трав'янистий покрив, моховий та лишайниковий покрив [143, 147]. Верхній ярус, в залежності від складу та віку порід, типу лісу, повноти деревостану та зімкнутості крон, впливає на такі фактори кліматоутворення як світло, тепло, атмосферні опади.

Стосовно перерозподілу приходної частини водного балансу - атмосферних опадів в лісі проведено досить багато досліджень, які наведено в роботах [140, 143, 146-148 та ін.]. Уявлення, що склалися на основі цих досліджень, у підсумку наступні - атмосферні опади в лісі зазнають значного перерозподілу, не діставшись поверхні грунту, частина осідає на кронах, частина стікає по стовбурах і осідає на стовбурах і лише незначна частина звичайного дощу, що не має характеру зливи, досягає поверхні грунту. Максимум затримки опадів кронами, або мінімум їх проникнення через крони спостерігається у 30-40-річних деревостанів. При подальшому збільшенні віку дерев спостерігається підвищення проникнення опадів через крону. Крім того, кількість опадів, що проникає під покрив, залежить від складу деревостану та густоти підліску. Так у темнохвойних лісах різного віку, що ростуть в різних географічних умовах, затримується в середньому 12– 32% від загальної кількості атмосферних опадів, що випадають на відкритому місці. Процент перехоплення атмосферних опадів молодим хвойно-листяним лісом складає 19– 25 %. Зрілими ялиновими, ялицевими та кедровими лісами затримується 27–31 %. Рідколісся та межа лісу затримує приблизно 12 % опадів [140, 143, 146-148 та ін.].

Опади, що досягли грунту розподіляються на декілька складових: одна частина формує поверхневий стік, інша йде на інфільтрацію в підземні води і перетворюється у підземний стік, ще одна частина акумулюється в грунті, тобто йде на збільшення вологості грунту. Вологість грунту в лісах помірного поясу знаходиться завжди на достатньому рівні і більше характеризує певний екотоп, ніж клімат. Там, де можлива акумуляція снігу зимою, а також випадає значна кількість опадів за сезон спокою, в добре дренованих грунтах до початку сезону вегетації завжди зберігається стан повної польової вологоємкості, або близький до нього. З початком потепління та вегетації рослин кількість грунтової вологи починає зменшуватись, якщо вона не поповнюється новими атмосферними опадами [143, 146-148 та ін.]. В межах лісових екосистем витратна частина визначається сумарним випаровуванням та стоком (поверхневим та підземним).

Більша частина сумарного випаровування забезпечується транспірацією дерев, яка змінюється в залежності від вологості ґрунту, рівня ґрунтових вод та стану атмосфери [147-149]. За даними робіт [147, 148] випаровування з ґрунту та стік в лісі залежать від складу лісу, а транспіраційні витрати, перш за все, від листової маси. Листова маса змінюється від віку та повноти деревостану, а також умов середовища. Так, в європейській частині Росії найбільші витрати вологи на транспірацію за вегетаційний період пов'язані з віком максимального розвитку листяної крони дерев і складають у ялини 300 мм, соснових – 250 мм, березових – 293 мм, дубових – 352 мм, ясеневих – 327 мм, осикових – 358 мм.

Не менше значення мають запаси вологи в грунті. За даними А.А. Молчанова [147, 244], які отримані при вивченні витрат на транспірацію сосняків в Московській області, найбільші транспіраційні витрати спостерігались при запасах вологи в метровому шарі грунту 180 мм. Вони склали 225 мм за вегетаційний цикл. Цікаво, що при подальшому збільшенні вологи до 380 мм в метровому шарі грунту транспіраційні витрати поступово знизились майже вдвічі - до 126 мм за сезон.

Розподіл опадів, що досягли поверхні грунту, між поверхневим стоком та інфільтрацією в багатьох випадках залежить від водно-фізичних властивостей грунтового покриву [146]. Як відзначає Г.В. Назаров [150], в усіх географічних зонах лісовим грунтам властива більша водопроникність ніж польовим. Висока водопроникність лісових ґрунтів обумовлена дренуючою роллю кореневих систем дерев, структурою лісових ґрунтів та лісовою підстилкою, що зберігає ґрунт від руйнування.

Роль рослинних угруповань у водному балансі кожної екосистеми визначається долею її витратної частини [140]. В різних умовах співвідношення між надходженнями та витратами води рослинами різна. У літній період витрати води рослинами більше або рівні надходженню вологи до них. В лісових рослинних угрупованнях, які формуються серед степів, транспіраційні витрати води найбільші. Вони визначаються більшою листяною масою та достатнім запасом вологи в ґрунті. За даними Л.Н. Касьянової [140], деревний ярус соснового лісу витрачає за три місяці 96,6 мм вологи. Листяний ліс – 182,3 мм. Листяний ліс в сухому степовому кліматі витрачає стільки ж води, скільки випадає опадів.

Відзначається, що зі збільшенням дефіциту води в межах даної території фітоценози зріджуються. Однак віддаль між окремими рослинами збільшується тільки над поверхнею грунту. Коренева ж система розповсюджується далеко в усі боки [141]. Тому віддаль між деревами визначається не змиканням крон, а радіусом кореневої системи дерев. Тому та чи інша структура фітоценозів, яка характеризується різним ступенем розрідженості рослинного покриву, надає можливість рослинам, які її складають, найбільш повно використовувати водні ресурси (запаси вологи) - це є фітоценотичний шлях регуляції водного балансу [140, 141]. Зазначимо, що, з іншого боку, характер природної структури фітоценозів дозволяє в певному наближенні оцінити водні ресурси даної ділянки території, що може бути використано при дистанційних дослідженнях.

Ю.Л. Цельникер підрахувала [цитується за роботами 140, 141], що зріджені ліси у східноєвропейській степовій зоні можуть існувати тільки там, де вони отримують не менше 110 мм опадів за рік, або 10 – 12 мм у місяць. В межах території України такі умови у середньо-багаторічній нормі існують майже скрізь. Але це співвідношення не завжди зберігається в окремі роки і в деякі роки воно коливається в сторону більшого або меншого зволоження. Зміна зволоження відображається на границях лісу та його підросту в степу.

Є всі підстави вважати, що крім захисних пристосувань в побудові та функціях транспіраційних органів рослин, регулювання водного балансу рослинами досягається головним чином за рахунок зміни органічної маси, яка формується на одиницю площі [139, 140].

Стосовно водообміну в рослинах в межах степів необхідно зазначити наступне. Підбір літературних даних щодо транспіраційних витрат степовими рослинними угрупованнями в різних регіонах за вегетаційний період [151, 152 та ін.] свідчить про те, що:

1) існує значна різниця в транспіраційних витратах степових фітоценозів в різних географічно віддалених районах від декількох десятків і навіть одиниць мм витрат води до декількох сотень мм на рік;

2) теоретично деякі степові фітоценози можуть мати високі транспіраційні витрати;

3) загальним фактором, що лімітує витрати води в степах є вологозабезпеченість території.

На основі аналізу результатів, що отримані багатьма авторами, Л.М. Касьянова [140] робить висновок, що сума транспіраційних витрат фітоценозами в межах степів є відображенням продукціонного процесу в рослинному та ґрунтовому покривах в різних наземних екосистемах з різними кліматичними умовами. Більшим транспіраційним витратам, як правило, відповідає більше накопичення біомаси фітоценозу [140 та ін.].

Транспіраційні витрати різних рослинних угруповань.

Наведемо відомості стосовно значень транспіраційних витрат за даними різних джерел, що використовувались автором для оцінки витрат води на транспірацію рослинними угрупованнями на основі класифікації земного покриття за багатоспектральним космічним знімком в межах Чорнобильської зони відчуження (див. наступний підрозділ). В табл. 3.3 та 3.4 показано транспіраційні витрати різними рослинними угрупованнями, які зібрано канд. біол. наук .О.І. Левчик за даними робіт С.Ф. Федорова, Ю.Л. Раунер та ін. [145, 153]

Таблиця	3.3.	Характеристики	транспірації	деревних	насаджень	за
систематизовании	ми мате	еріалами О.І. Левчик	к на основі робо <sup>,</sup>	ги С.Ф. Федо	рова [153]	

Вік деревостану, роки; таксаційні	Кількість	Маса листя (урої)	Транспірац За термо-	ція, мм/рік За	Коефіцієнт транспіраційної	Джерело			
характеристики	встовоург	(хвог) кг/га	ваговим методом	водним балансом	активності, м <sup>3</sup> /(кг∙рік).				
1	2	3	4	5	6	7			
	Соснове насадження								
10	5000	11500	260		0,227	Іванов			
33	3010	15965	361	371	0,226	Л.А та			
65	892	12050	272	245	0,231	ін. 1951.			
150	460	9000	203	181	0,226				
					середній – <b>0,228</b>				
Березове насадження									
35	2875	6500	335	350	0,515	Хильми			

60	524	6288	323		0,514	Г.Ф.,			
70	412	5564	286		0,514	1957;			
						Молчано			
					середній - 0,514	в А.А.,			
						1962.			
	Ялиновий деревостан								
78 років		29470	210		0.071				
10Е, повнота 0,7		27470	210		0,071				
25 років		15820	140		0.088				
10Е, повнота 0,9		13620	140		0,000				
Продовження таблиці 3.3									
Сосник-брусничник									
10		11000	250		0,227				
14		14200	261		0,184				
33		17200	345		0,201	Раунер			
65		13800	238		0,172	Ю.Л.,			
120		10600	208		0,196	1965			
150		8800	183		0,208				
					середній — 0 108				

100	0000	100		середній – <b>0,198</b>	
	Сосно	вий дерев	остій		
50 У зоні тайги				0,198	Молча- нов А.А., 1962
50 у зоні мішаних лісів				0,208	Молча- нов А.А., 1962
50 у степовій зоні				0,180	Молча- нов А.А., 1962

Таблиця 3.4. Матеріали щодо сумарного випаровування лісових насаджень (за даними Ю.Л. Раунер [153])

Тип лісу	Розташування пункту спостереження	Сумарне випаровування, мм/рік	Число років спостережен- ня, період	Автор
1	2	3	4	5
Сосновий ліс різних типів	Архангельська обл.	280	2 річний	Молчанов, 1960
Ялиновий ліс різних типів	Вологодська обл.	360	1 річний	Бірюков (цит. за Молчановим, 1960)
Листяний ліс	Ленінградська обл.	430	4 річний	Рутковський, 1940
Ялиновий ліс	Новгородська обл.	390	7 річний (V-IX місяці)	Федоров, 1962
Мішаний ліс	Калінінська обл.	380	3 річний	Васильєв, 1950
Листяний ліс	Московська обл.	450 (теплобалансові виміри)	2 річний (V-IX місяці)	Раунер, 1964 б
Сосновий ліс різних типів	Там же	430	6 річний	Молчанов, 1960
Ялиновий ліс	Там же	480	6 річний	Молчанов, 1960
Мішаний ліс	Там же	540	3 річний (V-IX місяці)	Васильєв, 1954
Сосновий ліс різних типів	Там же	435	3 річний (V-IX місяці)	Васильева, 1964
Мішаний ліс	Орловська обл.	500	3 річний (IV-X місяці)	Зонн и Кузьмина, 1960
------------------------------	---------------------	-----------------------------	---------------------------	--
Дубовий ліс	Курська обл.	600	7 річний (V-IX місяці)	Большаков, 1961
Дубовий ліс	Там же	530 (теплобалансові виміри)	3 річний (V-IX місяці)	Раунер, 1964 б
Листяні і соснові ліси	Сумська обл.	1. 550 5 річний		Готшалк, 1939, Фальковський, Висоцький, 1933
Дубові та осикові ліси	Воронезька обл.	470	6-10 річний	Молчанов, 1964
			Прод	овження таблиці 3.4
Дубовий ліс	Кіровоградська обл.	520	6 річний	Скородумов, 1964
Листяний ліс	Донецька обл.	500	2 річний	Висоцький, 1960б, Дулов, 1904
Листяний ліс	Миколаївська обл.	500	5 річний	Зарудний, 1965
Лісосмуга (листяні)	Уральська обл.	320	2 річний (V-IX місяці)	Степанець, 1963
Дубовий ліс	Донецька обл.	405	4 річний (V-X місяці)	Минович, Макаренко, 1964
Листяний ліс та лісосмуга	Луганська обл.	430	4 річний	Зонн, 1959

В роботі Л.М. Касьянової [140] наведена схематична класифікація екогруп рослин в основу якої, покладено їх транспіраційні витрати, що обумовлюються екологічними факторами середовища (а саме наявність вологи та температурний режим), при яких екологічна група рослин переважно зустрічається і почувається відносно комфортно. Виділяється екогрупа мезофітів, яка займає центральне положення в схемі класифікації. Виділяються також рослини. які потребують помірної зволоженості. та теплозабезпечення. До них відносяться листяні ліси. До екологічної групи ксерофітів належать рослини, що добре почуваються в сухому та жаркому кліматі. Це рослини арідних та напіварідних кліматичних зон. Гігрофіти потребують багато вологи та тепла. Характерні представники створюють тропічні ліси. Кріофіти пристосовані до холодного сухого клімату, а психрофіти почуваються добре в холодних умовах, але потребують достатньої кількості вологи. Існують проміжні транзитні форми гігромезофіти, мезопсихрофіти і т.п. Крім того, існують проміжні форми між основними екогрупами. Так до склерофітів відносять рослини, що, незалежно від кількості вологи, потребують холодних умов (до них відносяться багато рослин екосистеми бореальних лісів). Галофіти, навпаки, потребують тепла і можуть рости на засолених ґрунтах, а сукуленти для свого росту взагалі невибагливі до вологи і, як правило, ростуть в посушливих кліматичних умовах (алое, кактуси). За класифікацією П.А. Генкеля [136], сукуленти, що накопичують вологу в листях, є різновидом ксерофітів.

## 3.1.3 Вологість ґрунту

Вологість грунту визначають як кількість вологи в ґрунті, виражене у відсотках від її ваги (вагова вологість ґрунту) або об'єму (об'ємна вологість ґрунту). Динаміка зміни вологості ґрунту характеризує водний режим ґрунту. Вона має великий вплив як на хід біологічних процесів у ньому, так і на забезпечення рослин водою, що відповідно відображається на формуванні врожаю [154-156]. Спостереження за динамікою вологості грунтів на різних глибинах, як правило, входить в обов'язковий набір вимірів гідрометеорологічних станцій. Спостереження здійснюються в окремих точках шляхом періодичного взяття (у вегетаційний період, зазвичай, раз на місяць, а в зимовий період - раз на два місяці, або рідше) проб грунту на вологість на глибині від 0 до 1-2 м (інколи більше) з інтервалом 10 см.

По кожній спостережуваній точці складають хроноізоплети, що відображують хід вологості ґрунту залежно від його чинників. На осі абсцис відкладають терміни спостережень, а на осі ординат глибини ґрунтового профілю, де проводились виміри вологості ґрунтів. На тому ж ґрафіку часто наводяться дані, що характеризують кліматичні умови ділянки спостережень (як правило, хід температури та опади). Вибір розташування стаціонарних точок, що закладають, обумовлюється, як ґрунтовим профілем, який характеризує зональну зміну ґрунтів, так і впливом місцевих умов – геоморфологічні особливості (водорозділ, схил, низинна ділянка), типом рослинного покриву тощо.

При ознайомленні з графіком (рис. 4.1) привертають увагу, перш за все, періоди зимового зволоження верхніх шарів ґрунту потужністю 40-50-см, періоди річного його осушення і періоди щодо стійкої вологості ґрунту, який пішов під сніг при загальному підвищеному осінньому зволоженні. У верхньому шарі ґрунту потужністю 50-70 см коливання вологості найбільші. Нижче цього активного шару протягом більшої частини року ґрунтова вологість змінюється, загалом в досить вузьких межах (10-18%). Більш різкі відхилення у бік осушення (менше 7-8%) і більша вологість (30-35%) спостерігається відносно рідко. Неважко бачити з графіка (рис. 4.1), що динаміка вологості верхніх шарів ґрунту знаходиться в прямому зв'язку з погодними умовами, які визначаються, в основному, співвідношенням опадів і температури

Звичайно, наведені дані відображають певні типові випадки, але існує безліч варіацій змін динаміки вологості ґрунтів, які навіть для однієї точки будуть відмінні для окремих років в залежності від метеорологічних факторів. Тому необхідний постійний моніторинг вологості ґрунту, який з певними обмеженнями можна налагодити на рівні індивідуального господарства, але при цьому повинна бути створена система оперативного збору та аналізу інформації. Саме використання дистанційних даних у комбінації з точковими наземними завірковими спостереженнями надає таку принципову можливість.

Треба зазначити, що існують інші характеристики, що пов'язані з вологістю ґрунту, які визначають динаміку зміни вологості ґрунту і її якісні особливості відносно рослин. Мається на увазі те, що ступінь доступності вологи ґрунту для рослин визначається такими характеристиками ґрунту як вологоємність (здатність утримувати певну кількість вологи), водопроникність (здатність пропускати крізь себе воду), випаровуваність вологи і гігроскопічність ґрунту, здатність піднімати воду по капілярам ґрунту. При одній і тій же вологості ґрунту в залежності від цих характеристик певні рослини будуть почувати себе комфортно, або знаходитись на межі загибелі. Так вологість зав'ядання для більшості рослини для піщаних та супіщаних ґрунтів коливається біля 3-5% на суху вагу ґрунту, для суглинистих чорноземних ґрунтів - 15-18% и ще віще для торф'яних ґрунтів.

Тому для певного типу ґрунту та рослин визначають допоміжні характеристики вологості ґрунту, що допомагає визначити ступінь відхилення від нормального водозабезпечення. До таких характеристик належать: вологість зав'ядання, недоступна

вологість для рослин, вологоємність, яка розрізняється на максимальну молекулярну, найменшу (або польову), капілярну і повну (граничну польову) вологоємність ґрунту. Загалом вологоємність, як правило, збільшується при збільшенні кількості глинистих частинок в ґрунті. Найбільшою вологоємністю володіють органогенні горизонти - лісові підстилки та торф, які утримують вологи в 5-20 разів більше від своєї власної маси.

Коротко представимо розрахунок запасів легкодоступною і важкодоступній води в грунті [154, 155], що особливо важливо при вирощування агрокультур в той чи інший момент розвитку. Запаси води можуть виражатися як в міліметрах водяного шару, так і в кубометрах води на 1 га (1 мм водяного шару на 1 га відповідає 10 м<sup>3</sup> води). Маючи дані про вологість ґрунту, вологості зав'ядания і граничної польової вологоємності (виражені у вагових відсотках на сухий ґрунт), можна обчислити запас різних категорій вологи для кожного шару. Для цього дані вологості у вагових відсотках (W) множать на об'ємна вага (D) і на товщину шару в сантиметрах (H) і ділять на 10. У результаті отримують запас води шару ґрунту, виражений в міліметрах водного шару:

$$B = (W^*D^*H)/10$$
(3.1)

Наприклад, запас вологи в шарі грунту 0-15 см при об'ємній вазі 1,18 і вологості 22,5% буде дорівнювати:

B = (22.5\*1.18\*15)/10 = 40 мм (або 400 м<sup>3</sup>/га)

Запас води в заданій грунтової товщі (наприклад, 0-100 см) підраховується за формулою (3.2):

$$\mathbf{B} = 0.1 \left( \mathbf{W}_1 * \mathbf{D}_1 * \mathbf{H}_1 + \mathbf{W}_2 * \mathbf{D}_2 * \mathbf{H}_2 + \mathbf{W}_2 * \mathbf{D}_2 * \mathbf{H}_2 \dots + \mathbf{W}_{10} * \mathbf{D}_{10} * \mathbf{H}_{10} \right)$$
(3.2)

де  $W_1^*D_1^*H_1...$   $W_{10}^*D_{10}^*H_{10}$  - запас води кожного 10-сантиметрового шару.

За таким методом обчислюють:

1) запас води в ґрунтовій товщі в момент спостереження (В);

2) максимальний запас ґрунтової вологи, відповідний граничній польовій вологоємності (ПВ);

3) запас важкодоступної води, відповідний вологості зав'ядания (ВЗ), а отримавши ці дані визначають:

4) запас корисної для рослин вологи (В-ВЗ) і

5) дефіцит запасу грунтової вологи (ПВ-В).

Сучасні технології дозволяють проводити оцінку вологості ґрунту за допомогою супутників. Але отримані дані треба уточнювати з урахуванням завіркових точкових спостережень вмісту вологи в ґрунтово му покриві, кількості опадів, температури, типу ґрунту. В результаті можливо оцінити вологість ґрунту для практично кожної точки земного покриття, що надзвичайно корисно для агровиробництва.

## 3.2. Вибір основних параметрів, стосовно водообміну в рослинному та грунтовому покриві в межах агрофітоценозів, що можуть бути визначені на основі даних ДЗЗ

До параметрів, які використовуються для оцінки водообміну в системі ґрунтрослина–атмосфера в межах агроценозів і які бажано визначати на основі даних ДЗЗ для фітомоніторингу можуть бути віднесені вміст води в рослинах (у вегетативних органах), інтенсивність транспірації та параметри вологості ґрунту. Розглянемо можливості застосування даних ДЗЗ для оцінки даних параметрів з метою визначення стану водообміну в рослинах.

#### 3.2.1. Визначення температури

У попередніх розділах чітко показано вплив температурного фактору на параметри інтенсивності водообміну в рослинному покриві. Тому розглянемо можливості визначення

за даними космічної такого важливого показника, як температура поверхні, а також деякі підходи до використання дистанційно визначеної температури для оцінки зволоження земного покриття та інтенсивності водообміну в рослинному покриві.

Визначення LST (Land Surface Temperature) або температури поверхні Землі, можливо тільки за допомогою тих супутників, які мають на знімальний апаратурі тепловий канал. Для деяких супутників, таких як Landsat або NOAA, визначення значень температури за даними спектральних діапазонів необхідні проводити самотужки за формулами, як для супутників серії Landsat або шукати спеціально розроблені програми для супутників серії NOAA, а є супутники, наприклад EOS(TERRA, AQUA), МЕТОР, Suomi-NPP та інші, де крім даних зйомки в теплових каналах, розробниками пропонується створений ними продукт LST.

Продукти LST мають різне просторове розрізнення, різні часові серії, тому вибір має обумовлюватись переш за все метою задач, що вирішуються. Приклади деяких супутників, для яких можливо розрахувати або отримати продукт LST вказані у табл. 3.5.

Супутник	Сенсор	Просторове розрізнення LST, м	Часові серії LST
	TM	120	
Landsat	ETM	60	Миттєво
	TIRS	100	
NOAA	AVHRR	1100	Миттєво
EOS		1000	За день
	MODIS	1000	за 8 днів
(IEKKA,AQUA)		5600	за місяць
EOS (TERRA)	ASTER	90	Миттєво
METOP	AVHRR-3	1100m	За 10 днів

Таблиця 3.5. Супутники для визначення LST

Важливо зауважити, що продукти LST за день та 8 днів, звичайно, мають великий відсоток хмарності, в той час як, продукти LST за місяць майже не мають хмарності, але просторове розрізнення в місячному продукті LST значно гірше за продукти LST за день та 8 днів.

#### 3.2.2. Визначення евапотранспірації

Евапотранспирація – це сумарне випаровування від рослинності та ґрунту. Саме за таким означенням надаються дані продукту евапотранспирації (ЕТ) за космічними даними.

За даними космічної зйомки з космічного супутника NOAA та додаткових даних розраховано, глобально або на всю земну кулю, показник евапотранспирації (ЕТ) за період з 1983 по 2006 рік з просторовим розрізненням 8 км, 0.5 та 1 градус на кожний місяць. Приклад усередненої карти евапотранспирації (ЕТ) наведено на рис. 3.1.



Рисунок 3.1. Усереднена карта річної евапотранспірації (ЕТ) за даними з космічного супутника NOAA, за період з 1983 по 2006 рік

За даними космічної зйомки за допомогою радіометра MODIS/EOS та додаткових даних розраховано, показник евапотранспирації (ЕТ). Схема розрахунку продукту MOD16 евапотранспирації (ЕТ), наведена на рис. 3.2.



Рисунок 3.2. Схема розрахунку MOD16 ET [Mu, Q., M. Zhao, S. W. Running Remote Sensing of Environment/ Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm Volume 115, pages 1781-1800, 2011].

Дані надаються з 2000 до 2012 роки з просторовим розрізненням 1 км, 0.05 та 0.5 градусів та за час: 8 днів, місяць та рік. Приклад усередненої карти евапотранспирації (ЕТ) за даними MODIS наведено на рис. 3.3.



Рисунок 3.3. Усереднена карта річної евапотранспирації(ЕТ) продукту MOD16 за даними з космічного супутника EOS/MODIS, за період з 2000 по 2006 рік.

## **3.2.3.** Оцінювання вологості земного покриття за даними активного мікрохвильового зондування

Відомо, що в практиці дистанційного зондування Землі використовуються методи оцінювання вологості за даними активного мікрохвильового зондування [157-161 та ін].

Зокрема, запропонований в роботі В.Н. Сагаловича та ін. [158] спосіб є одним з варіантів такого підходу. Недоліком такого способу є необхідність враховувати неоднорідності в шорсткості та щільності ґрунту, які залежать від методів його обробки та впливають на корисний сигнал, що не завжди можливо в практиці досліджень. Наявність навіть незначного рослинного покриву також значно спотворює відбиття в мікрохвильовому діапазоні.

Одна з останніх робіт в цьому напрямку, в якій враховано недоліки мікрохвильового зондування вологості, це дослідження Н.В. Родіонової [157], яка пропонує алгоритм визначення шорсткості за даними мікрохвильового знімання для врахування в моделі визначення вологості ґрунту. Однак, і цей підхід має свої обмеження і недоліки. Визнається, що незначне рослинне покриття спотворює корисний сигнал, а застосування способу можливе лише в певних межах грудкуватості ґрунту та не враховує топографічні ефекти. Крім того, необхідна попередня обробка зображення по видаленню спекл-шумів, що може спричинити втрату інформації в окремих пікселах стосовно форм мікрорельєфу, зокрема, мікрозападин 3 аномальною вологістю і відбивними характеристиками, що можуть сприйматися, як спекл-шум. В той же час залишкові спеклшуми іноді надають хибні уявлення про характеристики вологості та розташування мікрозападиних форм.

# **3.2.4.** Використання вегетаційних та водних індексів для оцінки вмісту вологи земних покривів

Для вивчення характеристик водообміну в рослинному та ґрунтовому покривах за допомогою дистанційних даних важливу роль відіграють різноманітні вегетаційні та водні індекси. Зокрема, вегетаційний індекс – це показник, розрахований за даними спектральних каналів космічного знімку і який має відношення до параметрів рослинності або ґрунту. На теперішній час існує близько 160 варіантів вегетаційних індексів.

Вегетаційні індекси розробляють виходячи головним чином з особливості спектральної відбивної здатності рослинності або ґрунту. Наведемо деякі індекси, які плануємо використовувати в подальшій роботі.

*NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)* – нормалізований різницевий індекс рослинності, вперше був описаний Rouse B.J. в 1973 році – простий кількісний показник кількості фотосинтетичної активної біомаси. Один з самих розповсюджених та поширених індексів для вирішення задач, що використовують кількісну оцінку рослинного покриву.

Індекс обчислюється за наступною формулою 3.3:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)},$$
(3.3)

де NIR - коефіцієнт відбиття в ближній інфрачервоній області спектру; RED - коефіцієнт відбиття в червоній області спектру.

Розрахунок NDVI базується на двох найбільше стабільних (не залежних від інших факторів) ділянках відбиття спектральної кривої судинних рослин. У червоній області спектра (0,6-0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин, а в інфрачервоній області (0,7-1,0 мкм) перебуває область максимального відбиття клітинних структур листа. Тобто висока фотосинтетична активність (зв'язана, як правило, з густою рослинністю) веде до меншого відбиття в червоній області спектра та більшому в інфрачервоній, дивись рис. 3.4.



Рисунок 3.4. Ділянки характеристичної кривої відбиття рослинності (усередненої), що використовуються для розрахунку NDVI.

NDVI може бути розрахований на основі будь-яких знімків високого, середнього або низького розрізнення, що мають спектральні канали в червоному (0,55-0,75 мкм) та інфрачервоному діапазоні (0,75-1,0 мкм). Алгоритм розрахунку NDVI вбудований практично в усі поширені пакети програмного забезпечення, пов'язані з обробкою даних дистанційного зондування (ArcView Image Analysis, ERDAS Imagine, ENVI, Ermapper, Scanex MODIS Processor, ScanView та ін.). Наведемо в табл. 3.6 приклади спектральних каналів, що використовуються для різних супутників для розрахунку iндексу NDVI.

Таблиця 3.6. Комбінації каналів камер супутників, що використовуються для розрахунку індексу NDVI [162]

Космічний	Канали, що використовуються (довжина	Просторове

апарат/Прибор	хвилі)	розрізнення, м
NOAA/AVHRR	1 (0.58-0.68 мкм), 2 (0.72-1.0 мкм)	1100
Terra(Aqua)/MODIS	1 (0.62-0.67 мкм), 2 (0.841-0.876 мкм)	250
Landsat(4)/MSS	5 (0.6-0.7 мкм), 6 (0.7-0.8 мкм) або 7 (0.8-1.1 мкм)	30
Landsat(5)/TM	3 (0.63-0.69 мкм), 4 (0.76-0.90 мкм)	30
Landsat7/ETM+	3 (0.63-0.69 мкм), 4 (0.75-0.90 мкм)	30
EO-1 (Hyperion,	4 (0,630-0,690 мкм) 5 (0,775-0,805 мкм)	30
ALI)		
Resourcesat-1 (IRS-	2 (0,62-0,68 мкм) 3 (0,77-0,86 мкм)/3 (0,62-0,68	5,8/23,5/50-70
P6)/LISS-4/LISS-	мкм) 4 (0,77-0,86 мкм)/3 (0,62-0,68 мкм) 4 (0,77-	
3/AWiFS	0,86 мкм)	
IRS(1C/1D)/LISS	2 (0.62-0.68 мкм), 3 (0.77-0.86 мкм)	23,5
SPOT 2, 4	2 (0.61 – 0.68 мкм), 3 (0.78 – 0.89 мкм)	20
Монитор-Э	3 (0,626-0,672 мкм) 4 (0,783-0,883 мкм)	20
CBERS-1, 2/CCD	3 (0,63 - 0,69 мкм) 4 (0,77 - 0,89 мкм)	20
Terra/ASTER	2 (0.63-0.69 мкм), 3 (0.76-0.86 мкм)	15
THEOS	3 (0.62-0.69 мкм) 4 (0.77-0.90 мкм)	15
SPOT 5	2 (0.61 – 0.68 мкм), 3 (0.78 – 0.89 мкм)	10
ALOS/AVNIR	3 (0.61-0.69 мкм) 4 (0.76-0.89 мкм)	10
Formosat-2	3 (0,63-0,69 мкм) 4 (0,76-0,90 мкм)	8
RapidEye	3 (0,63-0,685 мкм) 5 (0,76-0,85 мкм)	5
	Прод	овження таблиці 3.6
Kompsat-2	3 (0,63-0,69 мкм) 4 (0,76-0,90 мкм)	4
OrbView-3	3 (0,625-0,695 мкм) 4 (0,76-0,90 мкм)	4
Ikonos	3 (0.63 - 0.70 мкм), 4 (0.76 - 0.85 мкм)	3.2
Quickbird	3 (0.63 - 0.69 мкм), 4 (0.76 – 0.9 мкм)	2.44 - 2.88
Ресурс-ДК	2 (0,60-0,70 мкм) 3 (0,70-0,80 мкм)	2 - 3
WorldView-2	5 (0,63-0,69 мкм) 7 (0,77-0,89 мкм)	1,84
GeoEye-1	<u> 3 (0,66 – 0,69 мкм) 4 (0,78 – 0,92 мкм)</u>	1,65

#### Водні індекси.

Ці індекси розроблені для оцінки вмісту вологи в рослинному покриві. Вміст води – важливий показник, високий вміст вологи характерний для здорової рослинності, що швидше росте та більше стійка до пожеж. Для розрахунків індексів використовуються ближній, середній та інфрачервоний діапазони, які чутливі до вмісту вологи в рослинному та грунтовому покриві [163-169 та ін.]. Індекси широко застосовуються при оцінці засухи, пожежонебезпеки на території разом з іншими індексами стану рослинності [163-169 та ін.].

1) WBI (Water Band Index) =  $\rho_{900} / \rho_{970}$ 

2) NDWI (Normalized Difference Water Index) =  $(\rho_{857} - \rho_{1241})/(\rho_{857} + \rho_{1241})$ 

3) MSI (Moisture Stress Index) = 
$$\frac{\rho_{1599}}{\rho_{819}}$$

4) NDII(Normalized Difference Infrared Index) =  $\frac{(\rho_{819} - \rho_{1649})}{(\rho_{819} + \rho_{1649})}$ 

5) Двохспектральний градієнтний індекс вологи BGWI, запропонований [163], розраховується, як наведено на рис. 3.5.



Рисунок 3.5. Схема розрахунку двуспектрального градієнтного індексу вологи BGWI, за [163].

Нами запропоновано водний індекс NWI (Normalized Water Index) (Сахацький, 2007), який, як показано в [164, 165], ефективний для визначення вмісту вологи, як в рослинному, так і в ґрунтовому покриві, але при цьому необхідні наземні завіркові дані.

NWI = 
$$(\rho_{550} - \rho_{1649})/(\rho_{550} + \rho_{1649})$$
.

### Для виявлення посухи, пропонується використовувати наступні індекси:

*VCI (Vegetation Condition Index)* – індекс умов росту рослинності, запропонував F.Kogan [170] і який розраховуються за наступною формулою:

$$VCI_{i} = [(NDVI_{i} - NDVImin)/(NDVImax - NDVImin)]*100\%,$$
(3.4)

де VCI<sub>j</sub> – значення індексу умов росту рослинності для дати j; NDVI<sub>j</sub> – зображення NDVI значень для дати j; NDVImax - зображення максимальних NDVI значень усередині всього набору даних; NDVImin - зображення мінімальних NDVI значень усередині всього набору даних.

Тобто VCI<sub>j</sub> – це процентне відношення значень NDVI за час ј стосовно максимальної амплітуди змін значень NDVI за розглянутий період часу. VCI використовують як показник умов росту рослинності в окремо взятому регіоні.

Кодап [170] успішно застосував цей індекс для моніторингу посухи та оцінки умов росту рослинності як у США, так і в інших країнах. Він з'ясував, що якщо використовувати цей індекс протягом багатьох років, то можливо оцінити потенційну здатність даного регіону для одержання врожаїв сільськогосподарських культур. Індекс VCI зменшує вплив природних факторів (погодних умов, географічних, екосистемних змін, ґрунтових, рослинних, топографічних умов), дозволяє порівнювати між собою відлік NDVI у різних природних зонах, різних ландшафтах і при різних погодних умовах. На прикладі південного Судану було виявлено, що індекс VCI має більш тісні зв'язки з кількістю опадів, що випали, чим NDVI [170].

Індекс VCI був успішно застосований роботі [171] при вивченні кліматології посухи на південно-сході Російської рівнини. Даний індекс застосовувався як показник посухи протягом 20 років. Значення VCI змінювалися від 0 до 100%, відображає зміни погодних умов вегетації від сухих до вологих. Умови вважаються вологими та сприятливими для рослинності на даній території при значенні індексу більше 70%. Зміни VCI у діапазоні 30-70% відображають близькі до норми умови зволоження. Стресовий стан рослинності наступає при значенні індексу менш 30%. Обчислювалися сезонні (травень - вересень) та місячні показники посухи. Місячний показник посухи визначався як частка від ділення суми місяців з VCI< 30% за різні роки на кількість досліджуваних років, сезонний показник враховував тільки період можливої посухи травень - вересень. У

такий спосіб була визначена середня багаторічна тривалість стресового періоду для різних районів і територій південного сходу Російської рівнини за ряд років. Було виявлено, що райони характеризуються особливою усередині сезонну зміною показника посухи, а середня тривалість посухи на значній частині території скоротилася в 1992 - 2001 роках у порівнянні з 1982 - 1991 роками.

Lui i Kogan [172] визначили, що індекс VCI має високу кореляцію з водним дефіцитом та опадами. Для саван і лісів з дощовими та сухими сезонами було запропоновано вважати, що посуха наступила, якщо:

- сума опадів, що випали за місяць у даному регіоні менше, ніж 50 мм;

- NDVI нижче 0.18;

- кількість опадів, що випали за місяць на 50% нижче норми (середньомісячних значень), при нормі більше 50 мм;

- VCI нижче, ніж 36%.

Водний стрес - це тільки одна із причин посухи. Для обліку всіх природних змін (температури повітря, сонячної радіації, фенофази культур) ці автори пропонують використовувати VCI для місяця або сезону, що розглядається. Цей індекс вони назвали «Сезонний індекс умов росту рослин» ("The monthly vegetation condition index MVCI"). Для січня цей індекс виглядає так:

MVCIj, Jan=[(NDVIj, Jan -NDVImin, Jan)/(NDVImax, Jan-NDVImin, Jan)]\*100%, (3.5)

де MVCIj,Jan - значення сезонного індексу умов росту рослинності для дати ј січня місяця; NDVIj, Jan - зображення з NDVI значень для дати ј січня місяця; NDVImax, Jan зображення максимальних NDVI значень усього січня; NDVImin, Jan - зображення мінімальних NDVI значень усього січня.

Зростання температури листа є гарним показником критичного вмісту вологи в рослинах і передує початку посухи. Збільшення теплового відгуку від листа рослини може з'явитися навіть коли рослини ще зелені, тому що продихи стискуються, щоб мінімізувати втрату води на випаровування. Це приводить до зменшення схованого теплового потоку. Однак для дотримання балансу енергетичних потоків відбувається збільшення теплового потоку, що, у свою чергу, приводить до збільшення температури листа. Критичний вміст вологи в рослинах наступає, коли потреба у воді більше, ніж її реальний вміст у ґрунті.

Коган [173] запропонував «Індекс температурного режиму» (TCI), що може бути обчислений тільки з довгострокових серій денних AVHRR даних температури земної поверхні:

$$TCIj = [(Tmax-Tsj)/(Tmax-Tmin)]*100\%,$$
 (3.6)

де TCIj - це індекс температурного режиму для j-ой дати; Tsj - температура земної поверхні для j-ой дати; Tmax - це максимальна температура земної поверхні із всіх знімків по всіх датах; Tmin - це мінімальна температура земної поверхні із всіх знімків по всіх датах.

Автор показав, що використання теплових каналів зйомки збільшує точність моніторингу посухи, допомагає пояснити температурний внесок для аналізу виникнення посухи, а так само забезпечує корисну інформацію для моніторингу рослинного стресу, обумовленого ґрунтовими умовами.

Відчутна перевага цього методу полягає в тому, що для обчислень потрібні тільки дані дистанційного зондування, тобто серії денних знімків у тепловому діапазоні. Недоліком є те, що на денні виміри в тепловому діапазоні впливають метеорологічні умови (температура повітря, швидкість вітру, вологість і т.д.), щоденні коливання яких важко враховувати.

Д.Л. Джупп і інші [174] використовували денні знімки Австралії в тепловому діапазоні для відстеження важливих (для прийняття рішень) умов навколишнього середовища. Вони запропонували *«Температурний індекс нормалізованої різниці» (NDTI)*, для того, щоб прибрати сезонні відхилення в аналізі денної температури поверхні ґрунту, отриманої з сенсорів AVHRR. Індекс NDTI розраховується по формулі 3.7:

NDTI=
$$(T_{\infty} - T_{s})/(T_{\infty} - T_{0}),$$
 (3.7)

де  $T_{\infty}$  – це температура поверхні, змодельована за умови нескінченного опору поверхні, тобто при евапотранспирації ЕТ дорівнює нулю;  $T_s$  – це температура поверхні, за даними сенсорами AVHRR; і  $T_0$  - це температура поверхні, змодельована за умови нульового опору поверхні (тобто при ЕТ максимальна).

Цей індекс є синтезованим і використовує як денні теплові зйомки ДЗЗ, так і метеорологічні дані.  $T_{\infty}$  і  $T_0$  можуть бути знайдені як температури, фізично обмежені зверху та знизу для даних метеорологічних умов і поверхневого опору. Вони визначають границі, в яких поверхневі температури за даними AVHRR можуть змінюватися. Якщо  $T_s$  близько до величини  $T_0$ , то це вказує на вологі умови росту. Навпроти, якщо  $T_s$  ближче

до величини  $T_{\infty}$ , то це вказує на посушливі умови.

Переваги індексу NDTI:

1. NDTI дуже точно відповідає реальній вологості. NDTI може бути використаний як стандартний продукт – реальної вологості, що обчислюється автоматично.

2. Коли NDVI високий, NDTI теж високий, оскільки вони обоє характеризують стан рослинності. Однак максимальні значення цих індексів не збігаються за часом, тому що NDTI характеризує настання метеорологічної посухи, а NDVI – сільськогосподарської.

NDTI більше чутливий до початку водного стресу в рослин, чим NDVI, тому що на даному етапі посухи, тобто на початку періоду зневоднювання кількість хлорофілу в рослинах не зменшується.

Індекс названий WSVI (The Water Supplying Vegetation Index), тобто «Вегетаційний індекс водних запасів». Він показує вплив посухи на сільськогосподарські культури, що дозволяє картувати посуху на великих ділянках. Індекс WSVI являє собою відношення NDVI до поверхневої температури, за даними 4-того спектрального каналу AVHRR, тобто:

Коли рослинність страждає від посухи, WSVI зменшується.

У США з 1998 року проводяться спостереження за появою та розвитком посухи в країнах різних континентів по даним NOAA/AVHRR. При моніторингу посухи використовують індекс VCI/T4. Значення індексу для Ефіопії коливаються в наступних межах:

- сприятливі умови для росту рослинності > 75;

- нормальні умови для росту рослинності - 40-50;

- слабка посуха - 30-40;

- сильна посуха - 10-30.

У результаті досліджень на прикладі Ефіопії з'ясувалося, що індекс VCI/T4 дозволяє розділити метеорологічну посуху від сільськогосподарської, тому що сильна метеорологічна посуха наступила в травні по всій території країни, а слабка сільськогосподарська посуха наступила тільки наприкінці червня і в окремих регіонах. Автори пояснюють це явище нагромадженням вологи в ґрунті після рясних дощів у лютому-квітні, яка компенсувала недолік опадів у наступні місяці й запобігла розвитку рослинного стресу в сухий період і втрату врожаю.

Тимчасові серії співвідношення *Ts/NDVI* є швидким показником посухи. Тимчасова мінливість температури повітря, довжини дня й сумарного випару в Папуа Нова Гвінея незначні протягом року. Це означає, що безліч тимчасових змін, що спостерігаються у співвідношенні *Ts/NDVI*, можуть бути приписані змінам у рівні опадів.

При використанні комбінованих індексів поряд з денними тепловими даними було запропоновано використовувати нічні теплові дані [175]. Аналіз ряду нічних і денних зображень у сезон посухи та у вологий рік показав, що сільськогосподарська посуха характеризується не тільки підвищеними денними, але й підвищеними нічними температурами. Імовірно, зниження температур уночі приводить до утворення роси й туманів, тобто до конденсації пар води на рослинах, що дозволяє уникнути рослинам стрес від зневоднювання. У цьому випадку настання атмосферної та ґрунтової посухи не приведе до розвитку сільськогосподарської посухи. Оскільки при настанні посухи вегетаційний індекс падає, а температури поверхні, що підстилає, ростуть, то для більш точного визначення моменту настання посухи і території її поширення запропоновано використовувати «*Iндекс посухи» ID (Index of Drought)*, що прямо пропорційний сумі нічної й денної температур і обернено пропорційний значенню нормалізованого вегетаційного індексу.

Індекс «посухи» обчислюється по наступній формулі:

$$ID = (T4_{\mathcal{I}} + T4_{\mathcal{H}})/NDVI, \qquad (3.9)$$

де Т4д і Т4н - (максимальна) денна та (мінімальна) нічна температури за добу всієї спостережуваної ділянки, отримана в 4 спектральному каналі AVHRR (або в аналогічному спектральному діапазоні іншої знімальної апаратури), NDVI - нормалізований вегетаційний індекс.

Зрозуміло, що чим вище значення індексу ID, тим більше ймовірність того, що на досліджуваній території спостерігається посуха. Для території Поволжя та Заволжя значення індексу ID у червні від 1000 до 1400 є нормальними, значення індексу від 1400 до 1600 свідчать про середню та сильну посуху, а понад 1600 - катастрофічній посусі.

Але посуха - це тільки одна причина, що впливає на зменшення NDVI і збільшення Ts. Існує ряд інших факторів, які можуть викликати зміни в показаннях AVHRR по NDVI і Ts. Вони включають: зміни в наземних покривах, такі, як горіння, сільськогосподарська обробка земель і рубання лісу, збій сенсорів, некоректне проведення атмосферної корекції між послідовними знімками та інше.

Для конкретних природних умов і різних завдань одні індекси можуть дати більш точні результати, чим інші. Порівнюючи результати розрахунків індексів з польовими даними, можна вибрати індекс, що максимально точно відображує досліджувану

властивість. У такий спосіб істотно підвищується точність результатів при наступній обробці.

### 3.3. Дистанційна індикація гетерогенності рослинного покриву

Оцінка можливості автоматизованого виділення окремих складових частин із сукупності різних родів рослин, що ростуть поряд є одним із завдань, які намагаються розв'язати за допомогою високоточних безконтактних дистанційних вимірювань. Таку спробу здійснено вченими з університету м. Кассель (Німеччина) з метою встановлення пропорції бобових (конюшини та люцерни) у бобово-злакових (з райграсом) травосумішках, вирощених у вегетаційних умовах. У цьому експерименті застосовувались методи регресії та вегетаційні індекси SR, NDVI, EVI, REP, розраховані зі спектрів відбиття різних варіантів травостоїв, отриманих спектрометром FieldSpec Pro JR [176].

Третій напрям використання наземних гіперспектральних даних відбиття рослинності – зіставлення їх з інформацією, отриманою зі сенсорів, встановлених на борту космічних апаратів. Застосування методики й техніки високоточного спектрометрування дозволяє перевірити, наскільки взаємоузгоджуються індекси, розраховані на основі гіперспектральних даних наземного оптичного дистанційного зондування (ДЗ) та аналогічні індекси, обчислені на підставі даних відбиття з порівняно ширших каналів космічних сенсорів. З них варто виділити вегетаційні індекси в області червоного краю (660-780 нм), за допомогою яких можна неруйнівними методами оцінити різноманітні параметри і культурної, і природної рослинності. Роботи в цьому напрямку проведені як для космічного апарату RapidEye, який вже функціонує на орбіті [177], так і для спеціально сконструйованих з метою дослідження рослинності й охорони довкілля мікросупутників VENµS та Sentinel-2, запуск яких планується у 2013 році [178].

В зоні червоного краю (660-780 нм) спектри відбиття рослин характеризуються високими значеннями коефіцієнтів відбиття та різкою швидкістю зростання цих показників [179, 180]. Величина швидкості зміни різна і залежить від типу та стану рослинного покриву, що дає можливість використовувати цю властивість при його класифікації. Особливо важлива тут довжина хвилі, на якій швидкість зміни спектра максимальна. Ця точка називається позицією червоного краю – надалі REP (the Red Edge Position) – і належить до вегетаційних індексів червоного краю, які можна визначати за гіперспектральними даними ДЗ. Цей індекс залежить від сумарного вмісту хлорофілу, який є показником функціонального стану рослин. Другим індексом, що характеризує вміст хлорофілу в рослинному покриві, є TCI (terrestrial chlorophyll index), який вперше визначено англійськими вченими [179] для даних сенсора MERIS як мерісівський наземний хлорофільний індекс МTCI (the MERIS terrestrial chlorophyll index). Третій індекс, який характеризує зміни спектрального відбиття в зоні червоного краю залежно від вмісту хлорофілу – модифікований нормалізований різницевий індекс червоного краю NDVI<sub>705</sub>, запропонований вперше в праці американських учених [181].

На жаль, в науково-дослідних установах України до 2009 року було відсутнє сучасне високотехнологічне обладнання для проведення польових вимірювань спектральних характеристик об'єктів у широкому діапазоні довжин хвиль з необхідною спектральною розрізненістю. Детальне дослідження спектрів відбиття рослин проводилось керівництвом С.М.Кочубей спеціально вченими під проф. на

сконструйованому для цього приладі з діапазоном реєстрації 400-750нм і кроком відбору інформації 1нм [182]. З появою в ЦАКДЗ ІГН НАН України цифрового спектрорадіометра FieldSpec® 3FR з'явилась можливість здійснювати спектрометрування наземного покриву в польових умовах. Дані вимірювань спектральних характеристик рослинного покриву використано як еталонні для зіставлення з даними космознімання сенсора Hyperion [183] та для визначення впливу просочування природного газу на спектральні характеристики пшениці над Глібовським родовищем [184].

Експеримент із спектрометрування сільськогосподарських культур було здійснено 16 червня 2010 року польовим спектрометром ASD FieldSpec® 3FR у степовій зоні України на дрібноділянкових посівах демонстраційного полігону елітного насіннєвого господарства «Золотий колос» поблизу м. Миколаєва. На рис. 3.6 світлим кольором позначено поле, на якому був розташований цей полігон.

На зазначену дату тут на ділянках довжиною 40 м та шириною півтора, 3 та 6 м вирощувались різні сорти 14 сільськогосподарських культур, характерних для степової зони України. Об'єктом досліджень були посіви різновидів озимої пшениці м'якої або звичайної (Triticum aestivum L.) та озимої пшениці твердої (Triticum durum Desf.), які під час спектрометрування перебували у фазі молочно-воскової стиглості.



Рисунок 3.6. Розташування поля (світлий прямокутник між точками 194 та 291), де знаходився демонстраційний полігон елітного насіннєвого господарства «Золотий колос», на якому 16.06.2010 р. здійснювалось спектрометрування сільськогосподарських культур.

#### Метеорологічна обстановка:

16 червня 2010 року о 7 год. ранку та в післяобідню пору було ясно, сухо й сонячно, лише в полудень спостерігалася мінлива хмарність. Температура повітря вранці була 30°С, вдень піднялась до 36°С. Спектрометрування здійснювалося від 12 до 14 год.

#### Основні технічні характеристики спектрорадіометра FieldSpec®3 FR:

ASD FieldSpec<sup>®</sup> 3F – польовий портативний переносний спектрорадіометр, який охоплює діапазон реєстрації від 350 до 2500 нм. Весь спектр 350-2500 нм відображається в реальному часі на дисплеї. Деякі інші характеристики спектрорадіометра наведено нижче:

- інтервал відліку – 1,4 нм у діапазоні довжин хвиль 350-1000 нм і 2,0 нм у діапазоні довжин хвиль 1000-2500 нм;

 спектральна розрізненність (повна ширина на половині максимуму) – 3,0 нм при 700 нм та 10 нм при 1400 нм і 2100 нм;

- яскравість, еквівалентна шуму (NeDL), для стандартного волоконно-оптичного кабеля довжиною 1,5 м становить: 1,4·10<sup>-9</sup> Вт/см<sup>2</sup>·нм – середнє значення при довжині хвилі 700 нм; 2,4·10<sup>-9</sup> Вт/см<sup>2</sup>·нм – середнє значення при 1100 нм і 8,8·10<sup>-9</sup> Вт/см<sup>2</sup>·нм – середнє значення при 2100 нм.

Кут огляду використаного об'єктива – 1°, висота над поверхнею грунту – 1,2 м, віддаль від об'єктива до ділянки спектрометрування посіву – 5 м. Калібрування до білого проводилось перед кожним вимірюванням на ділянці. Дані 10 спектрів усереднювались і використовувались для обчислення вегетаційних індексів червоного краю.

#### Методика обчислення вегетаційних індексів

У дослідженні використано три індекси червоного краю: позицію червоного краю REP [184], мерісівський наземний хлорофільний індекс MTCI [185], який позначено як TCI, та модифікований нормалізований різницевий індекс червоного краю NDVI<sub>705</sub> [186].

Обчислення вегетаційних індексів REP, TCI та NDVI<sub>705</sub> за даними спектрорадіометра FieldSpec<sup>®</sup> 3F здійснювалось за формулами:

$$REP = 701 + 41 \frac{(\overline{R} - R(701))}{(R(742) - R(701))},$$
(3.10)

$$\overline{R} = \frac{R(071) + R(783)}{2},$$

$$TCI = \frac{R(754) - R(708)}{R(700) - R(701)},$$
(3.11)

$$NDVI_{705} = \frac{R(750) - R(705)}{R(750) + R(705)},$$
(3.12)

Рід пшениці Triticum L. поліморфний за видовим складом. На демонстраційному полігоні зростали різні сорти двох озимих культурних голозерних видів: пшениці м'якої (ширина ділянок становила 3 м) та пшениці твердої (ширина ділянок – 1,5 м).

Як відомо [187], сорти м'якої пшениці значно відрізняються між собою за морфологією колоса, зокрема, за довжиною і типом остюків: цілком безості, з остевидними відростками, з вкороченими остюками, з остюками тільки у верхній частині колосу, цілком остисті. Остюки, як правило, розходяться в боки. З остистих різновидів у посівах озимої пшениці переважає еритроспермум, а з безостих — лютесценс. Тверда пшениця, на відміну від м'якої, має великий щільний колос, у розрізі квадратний або дещо стиснутий, з ширшою бічною стороною. Остюки майже вдвічі довші за колос, спрямовані паралельно до нього.

В табл. 3.7 наведено перелік сортів та різновидів озимої пшениці демонстраційного полігону, для яких отримано спектри відбиття.

Таблиця 3.7. Сорти пшениці демонстраційного полігону елітного насіннєвого господарства «Золотий колос» у Миколаївській області (16.06.2010 р.)

№ п/п	Сорт	Різновид	Остистість
1	Служниця	лютесценс	безоста
2	Безоста	лютесценс	безоста
3	Подолянка	лютесценс	безоста
4	Фаворитка	лютесценс	безоста
5	Херсонська безоста	лютесценс	безоста

6	Ліона	еритроспермум	короткоостиста
7	Селянка	еритроспермум	короткоостиста
8	Зміна	еритроспермум	короткоостиста
9	Ніконія	еритроспермум	короткоостиста
10	Кірія	еритроспермум	короткоостиста
11	Турунчук	еритроспермум	короткоостиста
12	Шестопаловка	еритроспермум	короткоостиста
13	Отаман	еритроспермум	середньоостиста
14	Подяка	еритроспермум	середньоостиста
15	Пошана	еритроспермум	середньоостиста
16	Куяльник	еритроспермум	середньоостиста
17	Тітона	еритроспермум	середньоостиста
18	Кохана	еритроспермум	середньоостиста
19	Херсонська 99	еритроспермум	середньоостиста
20	Аргонавт	гордеїформе	остиста
21	Лагуна	гордеїформе	остиста
22	Дельфін	гордеїформе	остиста
23	Алий парус	гордеїформе	остиста

На основі співвідношення довжини ості та колоса різновиди озимої пшениці нами було згруповано у чотири групи:

 безоста, в якої замість остюка зовнішня квіткова луска закінчується остюковим відростком, довжина якого не перевищує 0,5 см при довжині колоса 7-10 см;

короткоостиста – довжина остюків (2,5-3 см) приблизно вдвічі менша за довжину колоса (6-8 см);

 середньоостиста – довжина остюків (5-7 см) майже співмірна довжині колоса (6-8 см);

- остиста – наявні довгі остюки (10 см), які перевищують довжину колоса (4 см).

Слід зазначити, що до групи пшениць з безостим колосом належать тільки сорти озимої пшениці м'якої різновиду лютесценс, а до групи пшениць з остистим колосом – тільки сорти озимої пшениці твердої різновиду гордеїформе.

За даними спектрометра FieldSpec®3 FR було розраховано три вегетаційні індекси червоного краю, які характеризують фотосинтетичний потенціал рослин. Зведену таблицю їх значень в точках вимірювань спектрів різних сортів озимої пшениці наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8. Значення вегетаційних індексів червоного краю для різних сортів озимої пшениці на дрібноділянкових посівах Миколаївської області за даними спектрорадіометра FieldSpec<sup>®</sup> 3F від 16.06.2010р.

№ п/п	Сорт	Значення REP (нм)	Значення ТСІ	Значення NDVI <sub>705</sub>
1	Служниця	705,77	0,619	0,097
2	Безоста	711,91	0,812	0,101
3	Подолянка	719,69	1.710	0.329
4	Фаворитка	722,26	2,153	0,352
5	Херсонська безоста	716,40	1.274	0.234
6	Ліона	719,56	1.676	0.261
7	Селянка	718,9	1.647	0.286
8	Зміна	717,78	1.410	0.184
9	Ніконія	718,07	1.459	0.215

10	Кірія	720,26	1.787	0.267
11	Турунчук	718,93	1.563	0.228
12	Шестопаловка	718,78	1.525	0.206
13	Отаман	721,66	2.178	0.360
14	Подяка	719,17	1.621	0.261
15	Пошана	719,9	1.706	0.237
16	Куяльник	720,51	1.894	0.268
17	Тітона	720,79	1.913	0.284
18	Кохана	722,2	2.387	0.355
19	Херсонська 99	720,86	1.911	0.290
20	Аргонавт	721,1	2.289	0.424
21	Лагуна	722,59	2.511	0.412
22	Дельфін	722,7	2.541	0.445
23	Алий парус	722,17	2.366	0.419

Отримані дані було статистично оброблено відповідно до виділених чотирьох груп різновидів озимої пшениці з врахуванням кількості сортів кожного різновиду (табл. 3.9).

Таблиця 3.9. Значення вегетаційних індексів червоного краю та коефіцієнтів їх варіації для безостих та остистих різновидів озимої пшениці на дрібноділянкових посівах Миколаївської області за даними спектрорадіометра FieldSpec<sup>®</sup> 3F від 16.06.2010 р.

Distionut	Значення	Значення	Значення	Коефія	цієнти варіаі	țiï, %
гізновид	REP (нм)	TCI	NDVI <sub>705</sub>	REP	TCI	NDVI <sub>705</sub>
безості	715,21±2,93	1,31±0,28	$0,22\pm0,05$	0,91	48,11	54,45
короткоостисті	718,90±0,32	$1,58\pm0,05$	0,24±0,01	0,12	8,30	15,70
середньоостисті	720,73±0,38	$1,94\pm0,10$	0,29±0,02	0,14	13,55	15,98
остисті	722,14±0,36	2,43±0,06	0,43±0,01	0,10	4,92	3,34

За даними таблиці 3.9, найнижчі значення всіх розрахованих індексів червоного краю характерні для озимої пшениці різновиду лютесценс. Це, вірогідно, зумовлене тим, що відбивні поверхні посівів пшениць з безостим колосом в умовах степової зони України до середини червня 2010 року помітно втратили фотосинтетичні пігменти і візуально видавались жовтішими порівняно з остистими різновидами пшениці. Серед групи пшениць з різними за довжиною остюками для різновиду еритроспермум були властиві, як правило, колос зеленого кольору, а остюки – жовтуватого, в той час як у різновиду гордеїформе зеленими були і колос, і остюки (рис. 3.7).







Рисунок 3.7. Дрібноділянкові посіви озимої пшениці у Миколаївській області (фото 16.06.2010 р.): А – озима пшениця м'яка, колос безостий, різновид лютесценс, сорт Служниця; Б – озима пшениця м'яка, колос короткоостистий, різновид еритроспермум, сорт Шестопаловка; В – озима пшениця м'яка, колос середньоостистий, різновид еритроспермум, сорт Херсонська 99; Г – озима пшениця тверда, різновид гордеїформе, сорт Аргонавт.

Як показали результати обчислень, серед різновидів остистих пшениць зі збільшенням довжини остюків зростають значення всіх трьох розрахованих вегетаційних індексів червоного краю. Цей факт є ще одним підтвердженням участі остюків колоса у процесі фотосинтезу, особливо під час достигання зерна після усихання нижніх листків у фазі молочно-воскової стиглості, в якій власне і перебували рослини на момент спектрометрування. Ще І.А.Тарчевським [188] встановлено, що у рослин колосових злаків значний вклад у формування врожаю вносять асиміляти колоса. Залежно від сортових особливостей пшениці частка вкладу колоса в загальний вміст хлорофілу в окремі фази онтогенезу може бути доволі вагомою, досягаючи 50 % у фазі колосіння. Самі ж остюки також сприяють формуванню органічної речовини, частка їх вкладу в цей процес становить до 41% від нагромаджених колосом або до 12% від нагромаджених рослиною [189], хоча, як зазначають В.В. Моргун та В.Ф. Литвиненко [185], вклад остей у забезпечення продуктивності багато в чому залежить як від генотипу рослин, так і від факторів зовнішнього середовища.

За А.І. Носатовським [186], в стеблі з остистим колосом вода піднімається швидше, ніж у безостому, що має велике значення у посушливі періоди. Крім того, на поверхні остей є велика кількість продихів, що також сприяє прояву певних адаптаційних змін фізіологічних характеристик листового апарату в посушливих умовах [190].

Отже, виявлена нами методами наземного гіперспектрального ДЗ закономірність зростання значень індексів червоного краю зі збільшенням довжини остюків ще раз засвідчує той факт, що процес фотосинтезу проходить більш інтенсивно у колосі остистих сортів пшениці. Зважаючи на кращу пристосованість цих сортів до природних умов, зокрема, посухи, і завдяки додатковому фотосинтезу, більшість сортів озимої пшениці в Україні остисті.

Для досліджених сортів безостої пшениці властиве більше варіювання досліджуваних індексів, про що свідчать високі значення помилок середнього арифметичного кожного з індексів. Внаслідок цього при зіставленні значення REP безостих та остистих пшениць (табл. 3.9) відмінність між середніми значеннями лише в 2,4 рази перевищує помилку середнього арифметичного для сортів з безостим колосом.

Водночас, порівнюючи коефіцієнти варіації всіх трьох індексів, бачимо, що саме для REP характерні найменші ступені мінливості цього показника. Постає логічне запитання, чому сортам пшениць з безостим колосом притаманна доволі сильна варіативність індексу REP, у той час як мінливість його варіаційного ряду можна вважати незначною (адже вона не сягає навіть 1%)? Попередню відповідь на це питання можна отримати, проаналізувавши, які саме сорти безостої пшениці мають найбільші значення REP.

Як видно з табл. 3.8, найвищі показники REP пшениць з безостим колосом, майже тотожні величинам, характерним для остистих пшениць, властиві безостим сортам Подолянка і Фаворитка. Це короткостеблові високоїнтенсивні сорти озимої пшениці, які створені методами хромосомної інженерії, містять у своєму геномі житні транслокації і належать до нового покоління сортів, що забезпечують отримання рекордних урожаїв [185]. Колос рослин сорту Фаворитка майже безостий, тільки зрідка у верхній частині колосу можуть формуватися остюки, довжина яких коливається в межах 2-4 см. За даними Г.О. Прядкіної [191], цей сорт характеризується більшою тривалістю активної роботи листкової поверхні в репродуктивний період розвитку, що забезпечується підтриманням функціональної активності листків усіх ярусів рослини. Вченими ІФРГ НАНУ у прапорцевих листках сорту Фаворитка в період наливу зерна було виявлено такі особливості обміну речовин, які сприяють підтриманню функціонального стану фотосинтетичного апарату на більш високому рівні порівняно з традиційним сортом Миронівська 808 [192]. Автори дослідження підсумовують, що підвищена інтенсивність фотосинтезу прапорцевих листків високоїнтенсивних сортів озимої пшениці забезпечує кращу виповненість зерен і озерненість колосу, що й зумовлює їх вищу зернову продуктивність.

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

Зіставляючи коефіцієнти варіації, розраховані для трьох досліджених індексів, відзначимо, що для REP властива незначна мінливість варіаційного ряду (менше 1 % для всіх досліджених різновидів озимої пшениці), для TCI й NDVI<sub>705</sub> – незначна та середня (за винятком безостих пшениць, які демонстрували високі показники строкатості цих індексів через причини, описані вище). Можливо це пов'язано з методиками обчислення даних індексів, адже розрахунок значень REP ведеться на підставі відбиття покриву на чотирьох довжинах хвиль, TCI– трьох, а NDVI<sub>705</sub> – лише двох. Оскільки більшість коефіцієнтів варіації за абсолютним значенням не перевищує 20 %, можна стверджувати про порівняно незначну строкатість досліджуваних індексів червоного краю, а отже, про подальшу доцільність їх використання для вивчення особливостей відбиття рослинного покриву.

4. Розробка методу оцінювання індексу листкової поверхні (LAI) та біомасибіофізичних параметрів, які характеризують кількість та стан лісових рослинних угруповань, на основі даних LiDAR та польових вимірювань Одним з основних показників активності процесів фотосинтезу рослинністю є індекс листкової поверхні (Leaf Area Index - LAI). Він був введений D. Watson ще у середині минулого століття [193] для кількісного оцінювання фотосинтезуючої здатності листя і виявився одним з найбільш цінних, за своєю інформативністю і об'єктивністю, морфоструктурних параметрів рослинних екосистем. Індекс LAI сьогодні широко використовується при вивченні особливостей взаємодії рослинності з атмосферою, в моделях вуглецевого циклу, при оцінюванні продуктивності лісів, розрахунках фітомаси, тощо [69-71].

У роботі пропонується та досліджується дистанційний метод оцінювання індексу листкової поверхні LAI за даними авіаційної лідарної зйомки, тобто на основі зображень рослинності, які формуються за допомогою встановленого на літаку лазерно-локаційного сканера - авіаційного лідара (Light Detection and Ranging – LiDAR).

Мета даного дослідження – розробити методику оцінювання індексу листкової поверхні LAI на заданій території за даними авіаційної лідарної зйомки, а також провести експериментальну перевірку її можливостей.

#### Територія дослідження і вхідні дані

Дослідження щодо можливостей оцінювання індексу листкової поверхні LAI за даними авіаційної лідарної зйомки проводилися на базі ділянки лісу площею порядку 25 га на території лісництва Мартев надлісництва Тучно-Західнопоморського воєводства Польщі, (координати центру ділянки: E16°05'42" N53°11'38") (рис. 4.1). Особливості ділянки – переважає хвойна рослинність (соснові деревостани) з різним віковим складом. На означену ділянку було отримано лідарні дані, напівсферичні фотографії та аерофотознімки.

Лідарні дані були одержані за допомогою авіаційного лазерно-локаційного сканера Optech ALTM з такими характеристиками [www.optech.com]: робоча довжина хвилі 1,064 мкм; розрізненність по висоті - від 5 до 35 см (в залежності від висоти знімання); розрізненність на місцевості - близько 40 точок на 1 кв. м;можливість роздільної фіксації 4-х імпульсів по дальності;динамічний діапазон сигналу - 12 бітів.



Рисунок 4.1. Територія дослідження та пункти DHP.

Фотографії DHP були одержані за допомогою фотокамери D3000 з матрицею 10 мегапікселів та об'єктивом Fisheye-Nikkor "Риб'яче око" 10.5mm f/2.8, який дає змогу охоплювати простір в куту до 180°. Загалом було задіяне 55 точок фотографування DHP (рис. 4.1), кожна з яких була геопозиційована. Висота знімання, обиралась, як правило, на рівні висоти грудей людини, тобто 1,3 м. Всі фотографії DHP були зроблені в ранковій період часу до сходу Сонця, як це рекомендовано в [194].

Аерофотознімки використовувалися в роботі для полегшення вивчення території досліджень і визначення місць точок наземного фотографування.

#### Методика оброблення даних: схема і експериментальні результати

Методика дистанційного оцінювання LAI за даними авіаційного лідара реалізується за схемою, представленою на рис. 4.2. Згідно схеми, цифрове оброблення фотографій DHP та лідарних даних здійснюється окремо і незалежно.

Оброблення даних DHP проводилося програмним продуктом Gap Light Analyzer (GLA). За його допомогою кожне зображення DHP (рис. 4.3, A) розділялося на три псевдоканали, що спільно утворюють RGB-представлення (червоний, зелений та синій), з яких далі відбирався канал з найбільшою інформативністю. У якості такого був відібраний синий канал, оскільки він, як показано в [65, 195], забезпечує найбільш чітке розмежування між рослинністю, небом і змішаними пікселами, тому як фотозинтезуючі фітоелементи (листя, голки) мають набагато менший коефіцієнт відбиття і пропускання в синій області оптичного спектру. У бінарному вигляді це зображення представлено на рис. 4.3, Б. Використовуючи це зображення, програма GLA дозволила автоматично

виділіти прогалини (рис. 4.3, В), оцінити їх площі, провести інші необхідні обчислення і на виході видати оцінку LAI.



Рисунок 4.2. Схема оцінювання LAI за даними авіаційного лідара.

Обчислення LAI проводилися програмою GLA у двох варіантах: 1) аналізується розподіл випромінювання в межах просторового кута  $\pm 60^{\circ}$ ; 2) аналізується розподіл випромінювання в межах просторового кута  $\pm 75^{\circ}$ . Результат, що отримується у першому варіанті, позначається в програмі GLA як LAI4, другий результат - як LAI5 [196].

У нашому дослідженні оцінка величини індексу за даними лідару обчислювалась як середнє цих двох результатів:

$$LAI_{DHP} = \frac{LAI4 + LAI5}{2}$$
(4.1)  

$$A \qquad B \qquad B$$

Рисунок 4.3: А - фотографія DHP; Б - бінарне зображення у синьому діапазоні; В - результат оброблення бінарного зображення програмою GLA (чорний колір – рослинність, білий – небо, синій – суміжні піксели).

Процес оброблення лідарних даних реалізований за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення TerraScan фінської компанії Terrasolid. Процес починається з визначення та фільтрації точок, що належать до грунту(Gr). При вирішенні цієї задачі

виявилось, що в простих ситуаціях програма TerraScan здатна це робити в автоматичному режимі, але у разі складної морфології потрібно було втручання в програму TerraScan та налаштування певних параметрів.

Точки, що залишилися класифікуються на два класи в залежності від висоти розташування: що розташовані вище грунту до висоти 1,3 м включно (Other) та ті, що розташовані вище вказаної висоти (Veg).

Наступним етапом оброблення двох виділених шарів лідарних даних було визначення математичних змінних (регресорів) для побудови рівняння множинної регресії [197]. Для цього на територію дослідження спочатку було побудовано сітку (grid) з кроком 1 х 1 м. Проте виявилося, що у багатьох випадках кількість лазерних точок в чарунці такого розміру була менше 10, що впливало на точність значень отриманих змінних, тому було вирішено збільшити розмір кроку сітки до 3 м. Після об'єднання (join) сітки та лідарних даних для кожної чарунки було визначено такі метричні і статистичні параметри: щільність та кількість відбиття імпульсів випромінювання; середнє значення висоти (mean); мінімальне значення висоти (min); максимальне значення висоти (max); стандартне відхилення (stdv); коефіцієнт варіації (cv); процентилі висоти (5, 10, 25, 50, 75, 90, 95).

При побудові регресійної залежності кожний з цих параметрів може розглядатися як регресор. Крім того, у якості регресора може виступати індекс проникнення лазерного випромінювання (LaserPenetrationIndex - LPI), який визначається як [198]:

$$LPI_{ij} = \frac{Gr_{ij}}{Gr_{ij} + Veg_{ij}}, \qquad (4.2)$$

де Gr<sub>ij</sub>- щільність точок ґрунту; Veg<sub>ij</sub> – щільність точок рослинності.

Оскільки необхідні дані про щільність точок ґрунту та рослинності можуть бути отримані з результатів проведеної нами раніше класифікації масивів точок, то індекс LPI також може застосуватися як змінна при побудові формули регресії.

На рис. 4.4 показано розподіл цього індексу на територію дослідження. Тут значеннями LPI, близькими до 0, відображена ділянки з густою рослинністю, зі зростанням значень LPI збільшується рівень відкритості місцевості.



Рисунок 4.4. Розподіл індексу LPI на території дослідження.

Будемо шукати оцінку LAI, що отримується за допомогою даних авіаційної лідарної зйомки, через модель множинної регресії [198], а саме у вигляді :

$$\mathbf{y}_{i} = b_{0} + b_{1}x_{i1} + b_{2}x_{i2} + \dots + b_{p}x_{ip}; \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$
(4.3)

Тут через  $y_i$  позначено відповідну оцінку величини індексу листкової поверхні за даними лідарної зйомки, тобто LAI<sub>LiDAR</sub>;  $x_1, x_2, ..., x_p$  – незалежні змінні (регресори);  $b_0, b_1, ..., b_p$  – коефіцієнти регресії; p – кількість регресорів; n – кількість вимірювань;  $n \gg p$ .

Для побудови шуканого рівняння множинної регресії необхідно вирішити дві задачі: 1) відібрати найбільш інформативну сукупність регресорів з числа всіх можливих; 2) визначити коефіцієнти регресії.

Основні труднощі викликає перша задача, для її вирішення було застосовано метод послідовного виключення [197]. Розрахунки коефіцієнтів регресії проводилися із застосуванням методу найменших квадратів.

Суть методу послідовного виключення складається у тому, що спочатку в модель множинної регресії включаються всі можливі регресори (їх кількість p береться максимальною). Далі за допомогою певного критерію (у нашому дослідженні був використаний F-критерій) оцінюється внесок кожного регресора в підвищення точності. Якщо найменше значення критерію менше за обране попередньо деяке критичне значення, то відповідна змінна виключається з моделі (величина p зменшується на одиницю). Модель перераховується і знову обчислюються значення частинного F-критерію з порівнянням з критичним значенням і т. д. Процедура формування інформативної сукупності регресорів закінчується тоді, коли отримане найменше значення критерію буде більшим за критичне.

Зазначимо, що аналіз всіх змінних і вибір найбільш інформативних регресорів за описаними вище правилами був проведений з використанням програмного забезпечення JMP SASsoftware.

Після проведеного аналізу найбільш інформативними для побудови рівняння множинної регресії виявилися: CV (тобто stdev/min), LPI та процентилі P25, P50, P75, P90, P95. Проте, проаналізувавши останні три процентилі P75, P90, P95 (рис. 4.5), виявилось, що їх значення практично дублюють один одного. Тому було вирішено до рівняння множинної регресії включати тільки один з них - P75, як верхній квартель.



Рисунок 4.5. Графік щільності значень процентилей.

На рис. 4.6 у формі блочної матриці зображено зв'язок діаграм розсіювання обраних регресорів та коефіцієнту детермінації. Інші регресори не показали прийнятної кореляції з LAI<sub>DHP</sub>.



Рисунок 4.6. Матриця індивідуальної кореляції.

Далі були розраховані, з використанням методу найменших квадратів, коефіцієнти при відібраних регресорах і, в результаті, рівняння множинної регресії отримало вигляд:  $LAI_{LIDAR} = -1.14 + 3.31 \cdot LPI + 0.38 \cdot CV - 0.00766 \cdot P25 - 0.02 \cdot P50 - 0.14 \cdot P75.$ 

61



Для оцінки було точності підраховано коефіцієнт детермінації  $(R^2 = 0.638)$ та середньоквадратичне відхилення коефіцієнта регресії від його істинного значення (RMSE=0,0964). Загалом рис. 4.7 підтверджує наявність кореляційного тісного зв'язки між отриманими LAI з даних лідара та даних фотографування неба через навіс.

На рис. 4.8 зображено результат

оцінки LAI на територію дослідження з Рисунок 4.7. Лінійна регресія використанням одержаної регресійної моделі на момент проведення лідарної зйомки. Якщо, скажімо, відомі лідарні дані на різні періоди часу, то порівняння різночасових величин LAI надає можливість оцінювати зміни у стані рослинності і розробляти відповідні рекомендації.



Рисунок 4.8. Розподіл оцінок LAI на територію дослідження.

В роботі проведено стислий огляд існуючих методів оцінювання індексу листкової поверхні LAI і відзначено, що більшість методів виявляються малоефективними, якщо потрібно мати оцінки активності процесів фотосинтезу рослинності на великих площах. У подібних випадках приходять на допомогу дистанційні методи, й один з таких методів оцінювання індексу листкової поверхні розглянутий в роботі. Запропонована методика дистанційного оцінювання індексу LAI, в основі якої - регресійна модель зв'язку між значеннями індексу LAI і даними авіаційної лідарної зйомки.

Наведено результати випробування запропонованої методики, які підтверджують її працездатність та перспективність для оцінювання LAI рослинності на великих площах. Актуальними питаннями для подальших досліджень є збільшення точності дистанційних оцінок LAI за лідарними даними, забезпечення інваріантності оцінок до просторового

масштабу зйомки, а також вивчення можливостей дистанційного визначення інших показників активності процесу фотосинтезу рослинності на основі лідарних даних.

# 5. Розробка методу оцінювання LAI на основі багатоспектральних космічних знімків середньої просторової розрізненності та польових вимірювань

При розробці методу оцінювання LAI (рис. 5.1.) були використані багатоспектральні космічні знімки (MSI) середньої просторової розрізненності Landsat TM, RapidEye, «Січ-2».



Рисунок 5.1. Загальна схема оцінювання LAI на основі багатоспектральних космічних знімків середньої просторової розрізненності та польових вимірювань.

Так як вибір знімків залежить від об'єкту досліджень, а в даному випадку це рослинність, були обрані такі знімки, час зйомки яких припадає на вегетаційний період та фенологічні фази з максимальною продуктивністю (рис. 5.2). На більшій частині території України вегетаційний період починається в кінці березня, а закінчується в кінці жовтня [199].

Різні перешкоди (хмари, тіні та інші) потрапляють на знімки та ускладнюють аналіз даних. Тому для дослідження використані знімки, процент покриття хмарами яких не перевищує 10-15% від площі знімку, або частини знімку, яка відповідає території досліджень.



Рисунок 5.2. Часовий розподіл супутникових знімків.

Для приведення космічних знімків в єдину систему фізичних показників виконувалось попереднє калібрування, а також радіометрична та атмосферна корекція.

Данні перераховувались з DN (Digital Nmber) у реальні значення випромінювання на сенсорі (Reflect).

Для аналізу рослинності та відмежування її від інших природних та штучних об'єктів використовувався просторовий розподіл нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

За допомогою порогового вирішального правила (рис. 5.3) (в результаті інтерактивного аналізу території) будується маска рослинності досліджуваної території VCM (vegetation cover mask).



Рисунок 5.3. Дерево рішень класифікації просторового розподілу NDVI.

Маска рослинності застосовується до відкаліброваних багатоспектральних знімків. Отримане зображення було класифіковане в межах території дослідження методом максимальної правдоподібності та були виділені наступні основні класи: листяні та хвойні ліси, сільськогосподарські угіддя, луки та пасовища, ділянки з розрідженою рослинністю.

Проведено дослідження для складання регресійних залежностей LAI від NDVI.

Результати класифікації (Class) було проаналізовано та порівняно з просторовим розподілом NDVImask. Для кожного класу були обрані характерні пікселі (Points NDVI), значення NDVI яких рівномірно охоплювали діапазон від 0 до 1, та прокладено маршрути проведення польових вимірювань на ділянках, що розташовані в межах даних пікселей (рис. 5.4).



Рисунок 5.4. Картосхема польових вимірювань.

Вимірювання на ділянках проводились за схемою, зображеною на рис. 5.5, двома методами. За першим методом польовим люксметром FI (field illuminometer) визначалась освітленість  $\Phi$  під пологом дерев та на відкритій місцевості, що відповідає освітленості над деревами  $\Phi_0$ . Індекс листової поверхні (LAI point) кожної точки розраховували за формулою

$$LAI = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{\Phi_0}{\Phi}, \qquad (5.1)$$

де k - коефіцієнт, що характеризує інтенсивність поглинання світла.



Рисунок 5.5. Схема вимірювань на дослідній ділянці в межах піксела.

За другим методом проводилось фотографування картини розподілу світла під пологом дерев та одержання напівсферичних фотографій DHP (Digital Hemispherical Photography). Подальша обробка DHP проводилась в програмному продукті GLA (Gap Light Analyzer), виходом якого є конкретне значення листового індексу в досліджуваній точці (LAI point).

За даними вимірювань (Points NDVI та Points LAI) була побудована оптимальна по методу найменших квадратів сплайн-регресія (Regression) (рис. 5.6).



Рисунок 5.6. Регресійна залежність LAI (NDVI).

За отриманою регресійною залежністю LAI від NDVI було відновлено розподіл індексу LAI супутникових знімків.

Додавання значень LAI в межах маски рослинності утворює повну площу зелених насаджень території дослідження.

# 6. Оцінювання продуктивності основних сільгоспкультур агроценозів в різних ландшафтно-кліматичних зонах України за наземними та супутниковими даними на основі продуктів MODIS (MOD17)

У звітний період нами також виконано методичні розробки для дослідження динаміки та загальної суми валової первинної продуктивності (GPP) та чистої первинного продуктивності (NPP), що характеризує поглинання CO<sub>2</sub> в межах різних класів рослинного покриву, зокрема, посівів основних сільськогосподарських культур в різних областях України. Для розробок, в основному, використані наступні літературні джерела [37, 106, 200-209]. Зазначимо, що GPP та NPP визначаються з рівняння балансу потоків вуглекислого газу в системі грунт – рослина – атмосфера, яке може бути представлене у вигляді формули 6.1 [203, с.57]:

$$Fa = R\kappa + R\pi + RM - P\delta, \qquad (6.1)$$

де Fa-потік CO<sub>2</sub> над рослинним угрупуванням;

R<sub>K</sub>-дихання коренів;

Rл-дихання стебел і листків;

R<sub>м</sub>-виділення CO<sub>2</sub> внаслідок життєдіяльності ґрунтових мікроорганізмів;

Рб- загальна (брутто) первинна продуктивність, що позначається для екосистем також як GPP (Gross Primary productivity).

GPP – це фактично загальна кількість органічної речовини, створеної в процесі життєдіяльності організмами-продуцентами, переважно хлорофіловмісними рослинами фотосинтетиками на певній одиниці площі за певний відтинок часу. Цей показник тотожний як кількості променевої енергії Сонця, яку перетворено в енергію хімічних зв'язків новостворених органічних речовин, так і кількості засвоєного в процесі фотосинтезу вуглекислого газу. Оскільки в живих організмах дихання є неодмінною умовою отримання енергії, то частина створеної органічної речовини витрачається на підтримання існування самих рослин. Тому розрізняють ще й так звану первинну неттопродуктивність (Net Primary productivity - NPP), яка може бути розрахована із загальної продуктивності з урахуванням витрат органічної речовини на дихання коренів і наземних органів рослини (RA). Співвідношення між GPP і RA може бути виражене рівнянням:

$$NPP = GPP - R_A \tag{6.2}$$

На рівні фітоценозу нетто-потік вуглецю між атмосферою і екосистемами визначається балансом між поглинанням вуглекислого газу під час фотосинтезу (тобто загальною первинною продуктивністю рослинного угрупування GPP), і загальним диханням (R) як автотрофних (RA), так і гетеротрофних організмів (RH).

NPP фактично відповідає приросту органічної речовини в рослинах на певній території за одиницю часу. Цей показник значно частіше використовується для порівняння продуктивності окремих видів рослин, екосистем і біомів, ніж загальна (брутто) первинна продуктивність, яка враховує витрати органічної речовини на дихання автотрофних організмів. Визначення глобальних і локальних значень NPP необхідне також при вивченні складових вуглецевого циклу, оскільки NPP є показником швидкості обміну вуглекислим газом біоти з атмосферою.

Розробка методу оцінки GPP та NPP в межах агрофітоценозів нами розпочата для вегетаційного циклу осінь 2012 – осінь 2013 рр. за даними продуктів MODIS (MOD17 A2/A3). Саме для зазначеного вегетаційного періоду нами вперше за даними MODIS було проведено класифікацію рослинного покриву всієї території України з виділенням основних сільськогосподарських культур. Для центральних регіонів класифікація представлена на рис. 6.1.

Це дало змогу вперше для території України провести досить детальну оцінку внеску у валову первинну продуктивність (GPP) та чисту первинну продуктивність (NPP) трьох основних сільськогосподарських культур (озимі зернові, кукурудза, соняшник) для областей України (Київська, Черкаська, Дніпропетровська, Миколаївська), що розташовані в різних ландшафтно-кліматичних зонах.

Для виявлення динаміки поглинання CO<sub>2</sub> за вегетаційний період 2012 – 2013 рр. та оцінки сумарного внеску різними типами сільгоспкультур ми провели суміщення класифікованих знімків території України з продуктом MOD17, 8-денні серії яких дозволяють оцінити GPP та NPP в кг C/m<sup>2</sup> на добу усереднено для піксела в 1 км<sup>2</sup>. Детальний опис алгоритму створення продуктів MOD17 можна знайти в роботах [106, 200, 207-209]. Цей алгоритм базується на співвідношенні між активною поглинутою фотосинтетичною радіацією (APAR) та чистою первинною продуктивністю NPP, яке було запропоновано J. Monteith (1972) [106]. АРАК залежить від природних умов та типу рослинного покриву. Зокрема, J. Monteith встановив, що річне NPP добре зволожених та забезпечених добривами посівів сільгоспкультур має лінійну залежність від поглинутої фотосинтетично активної сонячної радіації (APAR), яка залежить від географічної та сезонної зміни довжини дня та потенційної радіації. На останню впливають хмари та аерозолі, а також геометрія листяної поверхні, що поглинає сонячну енергію [106, 200].



Рисунок 6.1. Результати класифікації земного покриття в межах центральних регіонів території України за знімками MODIS/TERRA у 2013 р.

Тому алгоритм створення продукту MOD17 передбачає використання низки інших даних, і, зокрема продукт MOD12Q1, що надає інформацію про класи земного покриття, та продукт MOD15, який забезпечує дані LAI та FPAR (частина поглинутою сонячної радіації) [106, 200, 208]. Для розрахунків також використовуються параметри, які специфічні для кожного типу земного покриття. Вони формують так звані таблиці BLUT (Biome Parameter Look-up Table), що докладно розглядається в [106, 200, 208 та ін.].

Для створення продукту MOD17/MYD17 розробники використовують дані класифікації, а саме продукт MOD12Q1, який надає розповсюдження класів земного покриття у відповідності до номенклатури IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme). Ці класи включають: 0 - водна поверхня; 1 – вічнозелені хвойні ліси; 2 – вічнозелені широколистяні ліси; 3 – хвойні опадаючі ліси; 4 – опадаючі широколистяні ліси; 5 – мішані ліси; 6 – зімкнуті кущі; 7 – луки з кущами; 8 – залісена саванна; 9 – саванна; 10 – луки; 11 – болота та зволожені луки долин річок, 12 – агроценози; 13 – урбанізовані території; 16 – земна поверхня з розрідженою рослинністю; 254 – некласифіковані піксели [106].

На території України розповсюджена лише частина з цих класів, а саме класи з номерами: 0, 1, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 16. При цьому класи: 0 - водна поверхня, 13 – урбанізовані території виключаються з розгляду при створенні продуктів МОD17/МYD17. Для цього використовується відповідна маска на зображеннях.

Таким чином, для вивчення динаміки та загальної суми поглинання CO<sub>2</sub> в межах площі, що займають окремі сільськогосподарські культури, необхідно було виконати власну класифікацію земного покриття, бо агроценози продукту MOD12Q1 не розділяються на сільгоспкультури.

Суміщення класифікованих зображень з продуктами MOD17 дозволило провести достатньо детальний аналіз зміни GPP та NPP для конкретних сільгоспкультур в процесі вегетаційного циклу 2012 – 2013 рр., а також у річному підсумку та виявити ряд особливостей з кількісною оцінкою в межах ряду областей України, що знаходяться в різних ландшафтно-кліматичних зонах.

Враховуючи те, що піксел продукту MOD17 має розмір 1км × 1км, тобто покриває площу в 1 км<sup>2</sup>, для зіставлення значень GPP та NPP з посівами сільгоспкультур на класифікованому зображенні ми вибирали поля окремих культур, що повністю охоплювали піксели MOD17. Те саме відноситься до інших класів земного покриття (листяні та соснові ліси, пасовища, луки заплав річок та зарості очерету. З кожної області для аналізу відібрано біля 30 ділянок, дані яких усереднювались для кожного класу в межах області.

Таким чином, для Миколаївської, Дніпропетровської та Черкаської (з південними районами Київської) областей за 8-денними серіями продукту MOD17 нами були отримані усереднені дані зміни GPP та NPP та їх річні значення за вегетаційний цикл 2012 -2013 рр. для посівів озимих зернових, соняшника, кукурудзи, а також деяких інших класів земного покриття.

Найбільш детально на даному етапі робіт такі дослідження виконано для Миколаївської області для 2013 р. Окремі результати цих досліджень представлено на рис. 6.2 – 6.6 та в табл. 6.1-6.2, зокрема, усереднені дані зміни GPP та NPP за період з 14 березня до 24 жовтня-2013 р. різних класів земного покриву (рис. 6.2 -6.4).



Рисунок 6.2. Динаміка GPP основних сільськогосподарських культур Миколаївської області (суцільна лінія – посіви озимих зернових, пунктирна лінія – посіви соняшнику, крапчаста лінія – посіви кукурудзи. По осі ОХ – початкова дата 8 денної серії знімку, по осі ОУ - GPP, кг С/ м<sup>2</sup> за день\*0,0001.



Рисунок 6.3. Динаміка GPP пасовищ та очерету Миколаївської області (суцільна лінія –пасовища, штрих-пунктирна лінія – зарості очерету). По осі ОХ – початкова дата 8 денної серії знімку, по осі ОУ - GPP, кг С/ м<sup>2</sup> за день\*0,0001.



Рисунок 6.4. Динаміка GPP деревостанів Миколаївської області (суцільна лінія – листяні, пунктирна лінія – хвойні). По осі OX – початкова дата 8 денної серії знімку, по осі OУ - GPP, кг C/ м<sup>2</sup> за день\*0,0001.

Попередні результати розробки методу оцінки валової первинної продуктивності (GPP) для озимих зернових за даними MOD17A2 показали, що зміна GPP для вказаних культур в Миколаївській області вдало апроксимується поліноміальною залежністю 4 ступеня.

Зокрема, для одного з типових полів озимих зернових в Миколаївської області ця залежність має вигляд (рис. 6.5):

$$y = 0.077895x^{4} - 2.3069x^{3} + 20.7093x^{2} - 53.2006x + 45.526(r^{2} = 0.932)$$
(6.3)

де у - GPP, кг C/ м<sup>2</sup> за день\*0,0001; х - номер 8 денної серії знімку МОD17A2 (0 відповідає початковій 8-денній серії з 14 березня 2013 р.).

Подальший аналіз функціональної залежності дозволяє визначити точки (період часу) максимального значення GPP та періоди його максимального зростання та спаду, що передбачається використати для оцінки врожайності озимих зернових культур для окремих полів. Планується також порівняти дані окремі результати з наземними завірковими дослідженнями за допомогою газоаналізатора.



Рисунок 6.5. Динаміка GPP одного з типових полів озимих зернових в Миколаївської області (суцільна лінія – дані GPP за MOD17A2, пунктирна лінія – апроксимація графіку зміни GPP поліноміальною залежністю 4 степеня,  $r^2 = 0,932$ ). По осі OX – номер 8 денної серії знімку MOD17A2 (0 відповідає початковій 8-денній серії з 14 березня 2013 р.), по осі OV - GPP, кг C/ м<sup>2</sup> за день\*0,0001.

На рис. 6.6 показано класифікований знімок Миколаївської області за 2013 р. за даними MODIS, що використовувався для визначення річних значень GPP та NPP по окремим культурам в межах області.



Рисунок 6.6. Результати класифікації земного покриття в межах Миколаївської області за даними MODIS у 2013 р. для оцінки динаміки зміни GPP та NPP для посівів сільгоспкультур.

Проведені нами підрахунки з використанням значень продукту MOD17 та даних класифікації показують, що для Миколаївської області внесок озимих зернових культур в загальну валову продуктивність (GPP) та чисту продуктивність (NPP) складає біля 27% при загальній площі, яка становить біля 25% від розрахункової площі області.

Значний внесок дає також соняшник та кукурудза, відповідно біля 20 % та 10 % від загальної GPP та NPP. Процентне значення GPP та NPP для кожної культури, а також для деяких інших класів земного покриття для порівняння наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Річні значення GPP та NPP для основних сільгоспкультур та інших класів земного покриву в межах Миколаївської області за даними MOD17 (вегетаційний цикл 15 жовтня 2012 р. – 15 жовтня 2013 р.)

Клас земного Покриву	Площа, км <sup>2</sup>	Усеред- нене GPP С кг/м <sup>2</sup> за рік	Усеред нене NPP С кг/м <sup>2</sup> за рік	Сумарне GPP для області С, т/рік	Сумарн NPP для області С, т/рік	% від GPP області	% від NPP обла-сті	% від роз- рахун- кової площіо бла-сті
Озимі зернові	5857,14	0,65784	0,48249	3853061	2826011	26,7	26,3	25,1
Соняшник	5405,75	0,5634	0,38965	3045600	2106350	21,1	19,6	23,17
Кукурудза	2358,25	0,6033	0,40431	1422732	953464,1	9,85	8,86	10,11
Сосновий ліс	194,54	0,73381	0,44343	142755,4	86264,87	0,99	0,8	0,834
Листяний ліс	732,26	0,9234	0,55551	676168,9	406777,8	4,68	3,78	3,138
Пасовища, луки на вододілах	1758,08	0,70409	0,53009	1237847	931940,6	8,57	8,66	7,535
Луки долин річок, забо- лочені луки	1877,32	0,81995	0,52662	1539309	988634,3	10,7	9,19	8,046
Інші класи*	5149,6	0,491311	0,47749	2530054	2458869	17,51	22,85	22,05
Загальна розра-хункова площа	23332,5	0,61948	0,46109	14447526	1075831 2	100	100	100

\*До інших класів входять ярі зернові культури, ріпак, овочеві культури, соя, виноградники, поверхня невеликих озер та річок, а також дороги, населені пункти сільського типу та невеликі інфраструктурні об'єкти, що не входять до маски продукту MOD17.

Підкреслимо, що розрахункова площа області не включає водну поверхню значних водойм та порівняно великих населених пунктів у відповідності до маски продукту MOD17. Якщо загальна площа області складає 24598 км<sup>2</sup>, то розрахункова площа – менша і становить 23332,5 км<sup>2</sup>, тобто вона приблизно дорівнює 95% від загальної.

Для наближеного перерахунку С кг/м<sup>2</sup> в CO2 кг/м<sup>2</sup> необхідно значення С кг/м<sup>2</sup> помножити на 3,67, а для переходу до CO<sub>2</sub> кг-моль/м<sup>2</sup> треба значення CO<sub>2</sub> кг/м<sup>2</sup> розділити на 44.

Для порівняння усереднених даних для розрахункової площі Миколаївської області річних значень GPP та NPP за вегетаційний цикл 2012 – 2013 рр. наведемо дані MOD 17 A3 за 2000 – 2010 р., які нами також перераховано і усереднено для розрахункової площі області (табл. 6.2).

Таблиця 6.2. Річні значення GPP та NPP усереднені для розрахункової площі Миколаївської області за 2000 – 2010 рр. за даними MOD17 A3

Рік	Усереднене GPP С кг/м <sup>2</sup> за рік	Усереднене NPP С кг/м <sup>2</sup> за рік
2000	0,6277	0,389
2001	0,7175	0,4309
2002	0,5957	0,3422
2003	0,6069	0,3661
		_

Продовження таблиці 6.2

		1
2004	0,7493	0,4611
2005	0,682	0,4213
	- )	- 3 -

2006	0,6866	0,4292
2007	0,4766	0,2756
2008	0,6858	0,4007
2009	0,5888	0,342
2010	0,7395	0,4328
Середнє	0,6506	0,3901

Звертають на себе увагу низькі значення GPP та NPP у 2007 році, коли у південних регіонах України була надзвичайно сувора посуха (табл. 6.1). Для решти років відхилення від середнього значення не такі значні і отримані нами усереднені GPP та NPP для Миколаївської області за вегетаційний цикл 2012 – 2013 рр. знаходяться в межах коливань для цієї решти років. У подальшому планується провести більш детальний аналіз зміни усереднених по області значень GPP та NPP відповідно до природних умов та структури посівних площ.

Кількісні показники динаміки зміни GPP та NPP рослинного покриву агроценозів в межах України за запропонованим методом для їх оцінки більш детально будуть досліджені на наступному етапі роботи.

# 7. Оцінювання зволоження земного покриття на основі продуктів MODIS (MOD11 та MOD13) для різних ландшафтно-кліматичних зон України, в першу чергу, південних регіонів (степова зона)

У звітний період нами проведена розробка методів для встановлення залежностей між індикаторами та біофізичними параметрами, що характеризують водообмін та стан зволоження земного покриття за результатами дистанційних спостережень та завіркових наземних вимірювань.

У якості індикатора, що характеризує стан зволоження земного покриття та водообмін у верхньому шарі ґрунту, за результатами дистанційних спостережень та завіркових наземних вимірювань запропоновано використання водного індексу NWI, що розраховується на основі нормованої різниці спектрального відбиття в зеленій та середній інфрачервоній смугах спектра. В деяких роботах, зокрема [209], цей індекс рекомендується використовувати для відокремлення снігового покриву і тому має назву NDSI (Normalized Difference Snow Index). Але, як показав наш досвід, використання нормованої різниці спектрального відбиття в зеленій та середній інфрачервоній смугах спектру дозволяє ефективно виконувати оцінку вмісту вологи як в рослинному покриві, так і у верхньому шарі відкритого ґрунту, виявляти ділянки мікрозападинних форм рельєфу з підвищеним вмістом вологи, де можлива підвищена міграція вологи та хімічних речовин з поверхні землі до водоносних горизонтів.

Зокрема, для  
формула  
набуває вигляду : 
$$NWI = \frac{GR(500 - 590) - SWIR(1580 - 1750)}{GR(500 - 590) + SWIR(1580 - 1750)}$$
зйомки SPOT-5,  
розрахунку NWI (7.1)

де GR(560-590) - спектральне відбиття в діапазоні довжини хвиль 500-590 нм, що відповідає зеленому спектральному каналу зйомки SPOT-5; SWIR(1580-1750) -
спектральне відбиття в діапазоні довжини хвиль 1580-1750 нм, що відповідає середньому інфрачервоному каналу зйомки SPOT-5.

В рамках даної роботи виконано подальшу розробку метода оцінки зволоження земного покриття на основі водного індексу NWI за даними зйомки MODIS.

Для розрахунків NWI використовувався 8-денний продукт MOD9A1 розрізненістю 500 м за даними зйомки MODIS TERRA, який містить дані спектрального відбиття в зеленій та середній інфрачервоній смугах спектру. Причому нами пропонується використання нового індексу MCRI (Moisture Condition Regional Index), який характеризує стану зволоження земного покриття для певного регіону і вираховується на основі залежності :

$$MCRI = (NWI t - NWI min) / (NWIt + NWI min)$$
(7.2)

де NWI t – поточне значення індексу NWI, розраховане за даними продукта MOD9A1; NWI min – значення індексу NWI для року, коли спостерігалась найбільша посуха в даному регіоні. Зокрема для південних регіонів України, така посуха спостерігалась у 2007 році.

Теоретичною основою метода є розробки наведені в роботі [165] стосовно оцінки зволоження земного покриття з використанням індексу NWI. Так, в роботі [165] наведено результати експериментів в межах тестової ділянки поблизу с. Єрківці Переяслав-Хмельницького району Київської області, де на полях спостерігається багато мікрозападин рельєфу, які можуть заповнюватись водою після тривалих дощів. На дану територію було отримано космічний знімок з супутника SPOT-5 (01.11.2005 р.) у 4-х спектральних каналах: зеленому (GR) в діапазоні 500-590 нм; червоному (RED) – 610-680 нм; в ближньому інфрачервоному (NIR) – 790-890 нм і в середньому інфрачервоному – 1580-1750 нм з високою просторовою розрізненністю (10 м для спектральних каналів GR, RED, NIR та 20 м для каналу SWIR).

Для одного з таких полів в результаті обробки вказаного знімка SPOT було побудовано NWI – зображення (рис. 7.1, А). Значення NWI обчислювались в кожному пікселі на основі залежності (формула 7.1). На отриманому NWI-зображенні більш зволожені місця виглядають світлішими, і в даному випадку світлі плями на зображенні в межах полів відповідають мікрозападинам рельєфу, що частково заповнені водою.

Щоб зробити оцінку можливого кількісного зв'язку між значеннями водного індексу NWI та вмістом вологи в поверхневому шарі ґрунту (1-10 см), були проведені наступні операції. Для схожих метеоумов, коли було отримано знімок, в межах тестового полігону відбирались проби ґрунту для визначення процентного вмісту вологи. Визначення процентного вмісту вологи проводиться на основі ГОСТ 28268-89 [211]. Координати точок відбору з точністю до декількох метрів визначались за допомогою приладу GPS. Далі була виконана оцінка кореляції між значеннями вологості в певних точках та значенням індексу NWI у пікселах, що відповідали точкам опробування. Результати зіставлення наземного опробування вмісту вологи в поверхневому шарі ґрунту за супутниковими даними SPOT (01.11. 2005 р.) показані на рис. 7.1, А-Д.

Спостерігалась чітка кореляція (на рівні  $r^2 = 0,73$ ) між значенням індексу NWI, обчисленого за формулою (7.1), та процентним вмістом вологи у поверхневому шарі грунту (рис. 7.1, Д). Ця кореляційна залежність дозволила побудувати карту вологості

поверхні ґрунту, де чітко фіксуються всі мікрозападинні форми з підвищеною вологістю (рис. 7.1, Б).

Спроба отримати кореляційні залежності між вологістю ґрунту та індексами, що вираховуються аналогічно до NWI, але використовують інші канали знімка, або значення лише каналів знімка, дала набагато гірші результати. Зокрема, на рис. 7.1, В показана низька кореляція ( $r^2 = 0,187$ ) між індексом, що розраховується аналогічно до NWI, але замість спектрального відбиття у зеленому діапазоні, використовується червоний діапазон, і значенням вологості в поверхневому шарі ґрунту. На рис. 7.1 подано аналогічний результат ( $r^2=0.266$ ) при використанні індексу NDWI [212], що розраховується на основі ближнього інфрачервоного та середнього інфрачервоного каналів зйомки.



Рисунок 7.1. Результати обробки знімка SPOT (01.11, 2005 р.) та зіставлення наземного опробування вмісту вологи в поверхневому шарі ґрунту за супутниковими даними: А — NWI–зображення, значення NWI розраховувалось в кожному пікселі за допомогою залежності (формула 7.1); Б — карта-схема вологості поверхні ґрунту, побудована на основі залежності, показаної на рис. 7.1, Д; В — кореляція між значенням вологості в поверхневому шарі ґрунту та індексом, що обчислюється аналогічно до NWI (формула 7.1), але замість зеленого діапазону використовується червоний діапазон; Г — кореляція між значенням вологості в поверхневому шарі ґрунту і індексом, що розраховується аналогічно до NWI (формула 7.1), але замість зеленого діапазону використовується зеленого діапазону використовується аналогічно до NWI (формула 7.1), але замість зеленого діапазон; Д — кореляція між значенням вологості в поверхневому шарі ґрунту і водним індексом NWI, розрахованим на основі залежності (формула 7.1).

Отже, запропонований індекс при використанні вказаних знімків SPOT в межах дослідної ділянки виявив найбільшу ефективність для оцінки зволоженості земного покриття та визначення мікрозападинних форм рельєфу, які можуть відповідати ділянкам живлення підземних вод та підвищеної міграції хімічних речовин у підземні води.

Враховуючи, ефективність індексу NWI для оцінки зволоження земного покриття, нами проведено розробку метода для ефективного використання продуктів MODIS. Слід зауважити, що дослідження використання даних MODIS для оцінки зволоження земного покриву є актуальними. Одна з останніх робіт в цьому плані є [213], де пропонується застосовувати перпендикулярний індекс вологості PMI (perpendicular moisture index) для оцінки зволоження листяних крон дерев лісу. PMI розраховується за даними 2-го та 5-го каналів зйомки MODIS.

Нами оцінку зволоження земного покриву за даними MODIS пропонується проводити за два кроки. На першому кроці - розраховувати індекс NWI для певного проміжку часу, і далі його використовувати для розрахунку запропонованого нами індексу MCRI (формула (7.2)). Для визначення NWI використовуються 4 та 6 канали зйомки. Для сенсора MODIS співвідношення (7.1) для розрахунку NWI набуває вигляду:

$$NWI = \frac{Ch4(\lambda = 545 - 565 \hat{i}) - Ch6(\lambda = 1628 - 1652 \hat{i})}{Ch4(\lambda = 545 - 565 \hat{i}) + Ch6(\lambda = 1628 - 1652 \hat{i})},$$
(7.3)

де вказані довжини хвиль, що відповідають четвертому (Ch4) та шостому (Ch6) спектральним каналам MODIS розрізненістю 500 м, значення спектрального відбиття в яких використовуються для розрахунків зазначеного водного індексу.

Як було показано в роботі [214] сам по собі нормований водний індекс NWI, що розраховується за даними TERRA/MODIS, можна застосовувати для моніторингу стану посівів відносно дефіциту вмісту вологи в ґрунті та рослинному покриві. Перевагою використання нормованого водного індексу (NWI) над нормалізованим вегетаційний індексом (NDVI), який часто пропонують для аналогічних робіт, є те, що по-перше, NDVI фіксує фактично зміну вмісту хлорофілу в рослинах, а не їх зволоженість. Іноді рослини досить успішно можуть протистояти посушливим умовам значний період і це призведе до фіксації засухи з певної затримкою. По-друге, використання NDVI на відміну від NWI, не дозволить провести оцінку зволоженості земного покриття в разі відсутності рослинного покриву.

Подальший розрахунок MCRI, використовуючи NWI, що загалом можливо лише за даними продукту MOD9A1, надає наступні переваги. По-перше, виконується автоматичне порівняння стану зволоження земного покриття для певного проміжку часу з найгіршими умовами зволоження для цього проміжку часу у минулому, що дуже корисне для оцінки сценарію розвитку ситуації для прийняття рішень. По-друге, MCRI зберігає всі переваги NWI і його можна використовувати як для рослинного так і грунтового покриву.

Практичне застосування індексу MCRI для 2014 р. показало, що для розрахунків MCRI попередньо треба проводити наступні операції:

1. Необхідно перевірити вихідні значення МОD9A2. Для деяких територій 8-денні серії містять похибки за рахунок хмарності. Це спричинює різке зростання NWI не за рахунок зволоження земних покровів, а внаслідок постійної хмарності у 8 денний період. Це добре виявляється на графіках зміни NWI, а також MCRI. Ці 8-денні періоди необхідно відкинути з розгляду.

2. Для розрахунків MCRI величини NWI необхідно приводити до умовних додатних значень лінійними перетвореннями. Зокрема, враховуючи, що NWI змінюється від інтервалі -1 < NWI < 1, для переведення NWI у додатний діапазон до кожного значення NWI можна додати 1. В іншому варіанті, який було використано для тестових

розрахунків, для переведення NWI у додатний діапазон його значення треба помножити на 100 і додати 100. Якщо не проводити подібні операції, то формула (7.2) розрахунку MCRI в деяких випадках не буде відображати фізичний сенс розрахунків, бо значення знаменника можуть бути менші 0, що змінить знак MCRI на протилежний.

3. Після розрахунків MCRI проводиться усереднення його для певної території, щоб зменшити вплив випадкових пікселів, які не характеризують загальний стан зволоження території.

Як приклад, далі наведено розрахунок MCRI на 2014 рік для території, що знаходиться на півдні України в Одеській області на межі з Миколаївською областю. Для NWI min вибрано їх значення у 2007 році, коли ця територія потерпала від суворої посухи.

#### Первині матеріали

Для дослідження зволоження території України було накопичено дані продуктів MODIS: MOD09A1. Вибір обумовлений тим, що цій продукт дається раз на 8 днів та наявністю зеленого спектрального каналу необхідного для розрахунку водного індексу. Нами було проведено накопичення даних на всю територію України. Оскільки Україна знаходиться в межах 4 квадрантів: h19v03, h19v04, h20v03 та h20v04, згідно схеми покриття продуктом MOD09A1, нами було накопичено 104 файлів для 2007 року та стільки ж для 2014 року. Таким чином на 26 дат, дивись табл. 7.1, нами було отримано через мережу Internet 208 файлів 8-денних композицій продукту MOD09A1.

	таблици / Стиветавления дат продукту иювоо/ит та календарног дати										
97	06.04.2014	137	16.05.2014	177	25.06.2014	217	04.08.2014	257	13.09.2014	297	23.10.2014
105	14.04.2014	145	24.05.2014	185	03.07.2014	225	12.08.2014	265	21.09.2014		
113	22.04.2014	153	01.06.2014	193	11.07.2014	233	20.08.2014	273	29.09.2014		
121	30.04.2014	161	09.06.2014	201	19.07.2014	241	28.08.2014	281	07.10.2014		
129	08.05.2014	169	17.06.2014	209	27.07.2014	249	05.09.2014	289	15.10.2014		

Таблиця 7.1. Співставлення дат продукту МОД09А1 та календарної дати

Продукт MOD09A1 зберігається в форматі \*.hdf та має такий вигляд, див. рис. 7.2

CHDF Layers (15)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 1 (620-670 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 2 (841-876 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 3 (459-479 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 4 (545-565 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 5 (1230-1250 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 6 (1628-1652 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Rurface Reflectance Band 7 (2105-2155 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Reflectance Band Quality (see Table 15)Bit Field32-bit unsigned integer4294967295Solar Zenith AngleDegree16-bit signed integer00	Valid Range	Scale Fac-
Storm Surface ReflectanceReflectance16-bit signed integer-28672Band 1 (620-670 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672S00m Surface ReflectanceReflectance16-bit signed integer-28672S00m Ruface ReflectanceBit Field32-bit unsigned integer-28672S00m Reflectance BandDegree16-bit signed integer4294967295Solar Zenith AngleDegree16-bit signed integer0View Zenith AngleDegree16-bit signed integer0		
500m Surface Reflectance Band 2 (841-876 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 3 (459-479 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 4 (545-565 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 5 (1230-1250 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 6 (1628-1652 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 7 (2105-2155 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Reflectance Band Quality (see Table 15)Bit Field32-bit unsigned integer4294967295Solar Zenith AngleDegree16-bit signed integer0	-100 - 16000	0.0001
500m Surface Reflectance Band 3 (459-479 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 4 (545-565 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 5 (1230-1250 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 6 (1628-1652 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Surface Reflectance Band 7 (2105-2155 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Reflectance Band 7 (2105-2155 nm)Reflectance16-bit signed integer-28672500m Reflectance Band Quality (see Table 15)Bit Field32-bit unsigned integer4294967295Solar Zenith AngleDegree16-bit signed integer0View Zenith AngleDegree16-bit signed integer0	-100 - 16000	0.0001
500m Surface Reflectance Band 4 (545-565 nm)       Reflectance       16-bit signed integer       -28672         500m Surface Reflectance Band 5 (1230-1250 nm)       Reflectance       16-bit signed integer       -28672         500m Surface Reflectance Band 6 (1628-1652 nm)       Reflectance       16-bit signed integer       -28672         500m Surface Reflectance Band 7 (2105-2155 nm)       Reflectance       16-bit signed integer       -28672         500m Reflectance Band Quality (see Table 15)       Bit Field       32-bit unsigned integer       -28672         Solar Zenith Angle       Degree       16-bit signed integer       0         View Zenith Angle       Degree       16-bit signed integer       0	-100 - 16000	0.0001
500m Surface Reflectance Band 5 (1230-1250 nm)       Reflectance       16-bit signed integer       -28672         500m Surface Reflectance Band 6 (1628-1652 nm)       Reflectance       16-bit signed integer       -28672         500m Surface Reflectance Band 7 (2105-2155 nm)       Reflectance       16-bit signed integer       -28672         500m Reflectance Band Quality (see Table 15)       Bit Field       32-bit unsigned integer       -28672         Solar Zenith Angle       Degree       16-bit signed integer       0         View Zenith Angle       Degree       16-bit signed integer       0	-100 - 16000	0.0001
500m Surface Reflectance Band 6 (1628-1652 nm)       Reflectance       16-bit signed integer       -28672         500m Surface Reflectance Band 7 (2105-2155 nm)       Reflectance       16-bit signed integer       -28672         500m Reflectance Band Quality (see Table 15)       Bit Field       32-bit unsigned integer       4294967295         Solar Zenith Angle       Degree       16-bit signed integer       0         View Zenith Angle       Degree       16-bit signed integer       0	-100 - 16000	0.0001
500m Surface Reflectance Band 7 (2105-2155 nm)     Reflectance     16-bit signed integer     -28672       500m Reflectance Band Quality (see Table 15)     Bit Field     32-bit unsigned integer     4294967295       Solar Zenith Angle     Degree     16-bit signed integer     0       View Zenith Angle     Degree     16-bit signed integer     0	-100 - 16000	0.0001
500m Reflectance Band Quality (see Table 15)       Bit Field       32-bit unsigned integer       4294967295         Solar Zenith Angle       Degree       16-bit signed integer       0         View Zenith Angle       Degree       16-bit signed integer       0	-100 - 16000	0.0001
Solar Zenith Angle         Degree         16-bit signed integer         0           View Zenith Angle         Degree         16-bit signed integer         0	NA	NA
View Zenith Angle Degree 16-bit signed integer 0	0 - 18000	0.01
	0 - 18000	0.01
Relative Azimuth Angle Degree 16-bit signed integer 0	-18000 - 18000	0.01
500m State Flags (see Table         Bit field         16-bit unsigned integer         65535	NA	NA
Day of Year Julian day 16-bit unsigned integer 65535	1 - 366	NA

Рисунок 7.2. Структура продукту MOD09A1 в форматі \*.hdf [215].

Після отримання всіх даних, за допомогою програми по обробці космічних знімків Erdas Imagine, нами було проведення формування мозаїк для 4 квадрантів: h19v03, h19v04, h20v03 та h20v04 для кожної з дат для зеленого каналу (545-565 нм) під номером 3 та середнього інфрачервоного каналу (1628-1652 нм) під номером 6. Вибір саме цього інфрачервоного каналу під номером 6 обумовлений тим, що його спектральний діапазон найбільш близько відповідає 5 каналу з супутника Landsat (1550-1750 нм). Приклади мозаїк за датою для зеленого та середнього інфрачервоного каналу наведено на рисунку 7.3:



Рисунок 7.3. Мозаїка 4 квадрантів: h19v03, h19v04, h20v03 та h20v04 зеленого (A) та середнього інфрачервоного каналів (Б) продукту MOD09A1 на 06 квітня 2007 р.

Використовуючи сформовану мозаїку, на кожну дату було зроблено 26-канальні знімки, за допомогою програми Erdas Imagine з використанням модуля Interpreter/Utilities/Layer Stack, для зеленого та середнього інфрачервоного каналу для 2007 та 2014 рр. на територію України, див. рис. 7.4.





Рисунок 7.4. Мозаїки з 26 каналів на територію України сформовані за даними продукту MOD09A1: для зеленого (А) та середнього інфрачервоного каналів (Б) за 2007 рік та зеленого (В) та середнього інфрачервоного каналів (Г) за 2014 рік.

Використовуючи створені 26-ті канальні знімки для зеленого та середнього інфрачервоного каналів на територію України, за формулою (7.1) запропонованою Сахацьким О.І. [165] для розрахунку нормалізованого водного індексу (NWI, нами були обчислені ці індекси для 2007 та 2014 року (рис. 7.5)).

Розрахунок проводився в програмі Erdas Imagine з використанням модуля Modeler/Model Maker. При цьому, щоб уникнути від'ємних значень NWI, були виконані їх лінійні перетворення – кожне значення NWIi було перераховано за формулою:

$$NWIi = 100*NWIi + 100$$
(7.4)

Таким чином було сформовано модель з розрахунку нового індексу MCRI.



Рисунок 7.5. Розрахований нормований водний індекс (NWI) за даними продукту МОD09A1 для 2007(A) та 2014(Б) років.

Результати обчислення нового індексу MCRI, сформованого за даними продукту MOD09A1, наведено на рис. 7.6.



Рисунок 7.6. Обчислення нового індексу MCRI для території України з використанням даних продукту MOD09A1 за 2007 та 2014 роки.

Для первинної оцінки та аналізу нового індексу MCRI нами було відібрана територія на півдні України, див. рис. 7.7. Територія складається приблизно з 2000 пікселів, кожний з яких має лінійні розміри 500 на 500 метрів, тобто обрана площа складає приблизно 50 км<sup>2</sup>. Для цієї території за новим індексом були розраховані середні значення на всі 26 дат, що наведені в табл. 7.1. Отримані розрахунки наведені в табл. 7.2 та представлені на рис. 7.8.



Рисунок 7.7. Межи тестової ділянки для розрахунку індексу MCRI

		- I	- F - / 1		) - r+		- <b>-</b>
N	DATE	DOY	MEAN	Ν	DATE	DOY	MEAN
1	06.04	97	75,613	14	19.07.2014	201	-9,507
2	14.04.2014	105	26,385	15	27.07.2014	209	-1,755
3	22.04.2014	113	-4,061	16	04.08.2014	217	-12,722
4	30.04.2014	121	11,019	17	12.08.2014	225	-0,065
5	08.05.2014	129	60,225	18	20.08.2014	233	-9,841
6	16.05.2014	137	52,749	19	28.08.2014	241	13,665
7	24.05.2014	145	-29,592	20	05.09.2014	249	37,856
8	01.06.2014	153	21,518	21	13.09.2014	257	43,739
9	09.06.2014	161	35,068	22	21.09.2014	265	-6,852

		•	•	LODI		٠
$130\pi M g / 2 P$	OSDAXVHOR CE	пелніх значе	нь інлексу		лля тестової терил	COD11
таолици 7.2. г	ospunynok ce	редних эни ю	пр підекеу		для тестовот тери	opn

10	17.06.2014	169	41,254	23	29.09.2014	273	46,699
11	25.06.2014	177	-7,364	24	07.10.2014	281	46,153
12	03.07.2014	185	32,606	25	15.10.2014	289	31,175
13	11.07.2014	193	8	26	23.10.2014	297	-17,288



DOY(Day of Year) Порядковий номер дня року

Рисунок 7.8. Співставлення на вміст вологи тестової ділянки в 2014 році відносно 2007 року за новим індексом MCRI.

Аналізуючи рис. 7.8 (графік індексу MCRI), можна зробити наступні висновки: в цілому 2014 рік виявився більш вологим в порівнянні з 2007 роком. З квітня по червень (або в значеннях DOY з 97 до 177), а також на початку липня (DOY=185) індекс MCRI був додатнім зі значеннями, які переважали 20 одиниць, тобто в порівняні з посухою 2007 року, можна зробити висновок про гарні природні умови відносно зволоження досліджуваної території. Починаючи з середини липня і до кінця серпня (DOY з 193 по 233) йде падіння значень індексу MCRI, а в деяких випадках як на 4 серпня (DOY=217) відносно велике від'ємне значення. На нашу думку це пов'язано з тепловим режимом території, тобто надмірна сонячна радіація привела до зниження індексу MCRI, починаючи з кінця серпня і до кінця жовтня ми маємо стрімке наростання індексу MCRI. Такий графік індексу MCRI при порівнянні 2014 та 2007 років може означати, що в 2014 році посухи не було, а низькі значення індексу впродовж 1,5 місяця, з середини липня до кінця серпня обумовлені температурним режимом, який не призвів до значної посухи на тестовій ділянці. Окремі від'ємні значення індексу MCRI, як у випадку DOY (113,145, 177 та інших) можливо пояснити, тим, що за 8 днів не було ясної погоди і в результуючий файл входять значення хмарного покриву, що безумовно, вносить похибку в розрахунок, оскільки порівнюються спектральні яскравості хмар та підстильної поверхні.

Розробка метода стосовно відповідності значень MCRI рівню зволоження земного покриття на кількісному рівні буде виконана на наступних етапах досліджень. На даному графічні залежності та принципова можливість етапі показано застосування запропонованого методу для оцінки зволоження земних покровів.

#### 8. Розробка алгоритмів визначення температури та спектральних коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні за матеріалами інфрачервоного знімання

Температура поверхонь, що випромінюють тепло, незалежна від довжини хвилі випромінювання і може бути відновлена з будь-якої кількості каналів сенсорної системи, але спектр теплового випромінювання різних поверхонь є досить складним і для вивчення потребує декілька каналів у діапазоні 8-14 мкм.

Складність спектру теплового випромінювання обумовлена різними значеннями коефіцієнта теплового випромінювання в різних спектральних діапазонах. Багатоканальні сенсори електромагнітного випромінювання дозволяють будувати залежність густини випромінювання, що надходить від поверхонь та параметрів самої досліджуваної поверхні.

Відновлення значення коефіцієнта теплового випромінювання за значенням спектральної щільності енергетичної яскравості в одному спектральному діапазоні неможливе через додаткову ступінь свободи, яка утворюється залежністю радіаційної температури поверхні від її коефіцієнта випромінювання, який є невідомим.

Застосування багатоканального знімання дозволяє встановити цю залежність, і на її основі розрахувати як фізичну температуру поверхні, так і її коефіцієнт теплового випромінювання [216]. Вихідними даними є значення спектральної густини енергетичної яскравості на апертурі сенсора в робочих діапазонах сенсора  $L_i$  (мінімум два), які необхідно попередньо відкалібрувати та усунути вплив на випромінювання теплового діапазону факторів, які вносяться атмосферою, значення робочої довжини хвилі випромінювання у кожному каналі сенсора та вихідне максимальне значення коефіцієнта теплового випромінювання ( $\varepsilon_{max}$ ), близького до абсолютно чорного тіла (наприклад, 0,99).

За оберненою формулою Планка (8.1) для кожного зображення розраховується значення радіаційної температури  $T_i$  із застосуванням  $\varepsilon_{max}$ :

$$T_i = \frac{c_2}{\lambda_i \ln\left(\frac{c_1}{\lambda_i^5 L_i} + 1\right)},$$
(8.1)

де  $c_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup> і  $c_2 = \frac{hc}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2}$  м·К – перша і друга константи

теплового випромінювання,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка,  $c = 2,998 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі,  $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана,  $\lambda_i$  – робоча довжина хвилі електромагнітного випромінювання [217].

Із усіх результативних зображень обирається зображення із максимальним значенням температури ( $T_{\max}$ ). Далі на основі  $T_{\max}$ та спектральної щільності енергетичної яскравості у кожному спектральному діапазоні для кожного із зображень розраховується значення коефіцієнта теплового випромінювання  $\varepsilon_i$ .

Наступним кроком є виконання нормалізація коефіцієнтів теплового випромінювання наступним чином:

$$\beta_i = \frac{\varepsilon_i}{\sum_{i}^{n} \varepsilon_i}, \tag{8.2}$$

де  $\beta_i$  нормалізовані коефіцієнти теплового випромінювання;  $\varepsilon_i$  – коефіцієнти теплового випромінювання; n – кількість спектральних каналів знімальної системи.

Максимальне значення β<sub>i</sub> включається до розрахунку мінімального значення коефіцієнта теплового випромінювання, який має наступний вигляд:

$$\varepsilon_{\min} = a + b (\Delta \beta_{\max})^{\gamma}, \qquad (8.3)$$

де  $\Delta\beta_{\text{max}} = \beta_{\text{max}} - \beta_{\text{min}}$ ; а параметри *a*, *b* та  $\gamma \in$  власними параметрами знімальної системи та визначаються в лабораторних умовах. Виконання розрахунку  $\varepsilon_{\text{min}}$  дозволяє нівелювати невизначеність коефіцієнта теплового коефіцієнта при розрахунку радіаційної температури і дозволяє визначити його фактичне значення наступним чином:

$$\varepsilon_i = \beta_i \frac{\varepsilon_{\min}}{\min \beta_i}.$$
(8.4)

Таким чином стає можливим розрахунок фізичної температури поверхні за отриманими коефіцієнтами теплового випромінювання за оберненим рівнянням Планка та вихідними значеннями спектральної густини енергетичної яскравості на апертурі сенсора [218]. Розраховані значення порівнюються між собою, та максимальна різниця температур  $\Delta T_{\rm max}$  порівнюється із деяким попередньо визначеним граничним значенням різниці. Якщо розрахована різниця більша за граничну, то розраховані кінцеві значення коефіцієнта теплового випромінювання застосовуються для повторної нормалізації, і процедура визначення параметрів поверхні виконуються ітераційно до того моменту, доки максимальна різниця розрахованих температур буде меншою за граничну.

Даний метод на основі багатоканального знімання дозволяє позбутися невизначеності при визначенні коефіцієнта теплового випромінювання (внутрішнього параметра поверхні, і, як наслідок, незалежної змінної) та температури поверхні (залежної змінної) за попередньо відкаліброваними даними багатоканального знімання у тепловому діапазоні електромагнітного спектру, до яких також застосовується коригування впливу атмосфери. Також він дозволяє побудувати регресійну залежність спектральної густини енергетичної яскравості від коефіцієнта теплового випромінювання в заданому діапазоні електромагнітного спектру.

# 9. Валідація методів дистанційного оцінювання біофізичних параметрів рослинності при оцінках впливу атмосферного аерозолю на стан природного середовища

Проведення валідації розроблених методів дистанційного оцінювання біофізичних параметрів передбачало оцінку якості значень валової первинної продуктивності та індексу листкової поверхні, отриманих на основі використання цих методів, за даними наземних вимірювань. Також здійснювалася оцінка кореляції між температурними показниками та продуктивністю рослинного покриву.

## 9.1. Метод оцінки валової продуктивності рослинного покриву агрофітоценозів

Продукційний процес посівів вивчається досить давно - до нього привернуто увагу фахівців різних галузей науки і практики - фізіології рослин і екології, фізики, метеорології і кліматології, ґрунтознавства, математики та інших. Результати досліджень і загальний стан проблеми представлені в монографіях, збірниках праць, статтях, підручниках і навчальних посібниках, зазначається в огляді [219]. Слід зазначити, що процес формування і величина біологічної продукції рослин пов'язані з загальною біомасою посівів, а урожайність – з масою господарськи цінних органів. В сучасних умовах різкого збільшення доступних і високоякісних супутникових матеріалів дистанційне вивчення продуктивності рослин набуває особливої актуальності. Розробка методів дистанційного зондування озимих культур, які враховують особливості їх фенологічного розвитку дозволила на сьогодні створити досить ефективні алгоритми їх автоматизованого розпізнавання та оцінки стану на основі супутникового моніторингу сезонної динаміки спектрально-відбивних характеристик посівів [220]. При цьому за основу найчастіше береться поведінка найбільш відомого вегетаційного індексу NDVI, який розраховується за супутниковими даними і за допомогою регресійних моделей пов'язується з урожайністю посівів. Величина NDVI корелює з площею асиміляційної поверхні рослин і вмістом в ній хлорофілу [165], а отже, тісно залежить від продуктивності сільськогосподарських культур, котра є функцією потенційної ефективності їх фотосинтетичного апарату [221]. Саме тому зростає увага до можливостей вивчення продуктивності рослин за допомогою супутникових даних. Зокрема, в поточному році у цитованій вище роботі [220] на основі знань про механізми продукційного процесу сільськогосподарських культур та відповідні біофізичні моделі супутникових даних і результатів їх обробки було запропоновано новий вегетаційний індекс, що розраховується за даними дистанційних вимірювань спектрально-відбивних характеристик посівів і демонструє наявність досить стійкого і тісного лінійного зв'язку з величиною врожайності озимої пшениці. Новий показник названо вегетаційним індексом фотосинтетичного потенціалу посіву і він розраховується за даними MODIS з використанням коефіцієнтів спектральної яскравості в червоній і ближній ІЧ областях спектру. Автори проаналізували зв'язок його величин, розрахованих для певних фаз росту і розвитку рослин озимої пшениці, з врожайністю посівів і виявили, що вже в період колосіння з певним ступенем вірогідності можна прогнозувати продуктивність. Точність прогнозу в наступні фази збільшується. Значення коефіцієнта детермінації між показниками нового індексу і врожайністю зерна озимої пшениці в 2013 і 2014 роках склали відповідно 0,88 і 0,71, що дозволяє припустити високий рівень інформативності розробленого індексу для оцінки фізіологічного стану посівів і прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур.

Проте окрім власне знімків у переліку дистанційних даних зі спектрорадіометра MODIS є і продукти, які безпосередньо надають значення валової та чистої первинної продуктивності наземного рослинного покриву – це так званий продукт MOD 17. Метою наших досліджень було зіставлення даних валової первинної продуктивності за супутниковим продуктом MOD 17 з виміряною камерним методом валовою первинною продуктивністю та величиною синтезованої надземної біомаси виробничих посівів ОП.

За планом робіт у 2016 році було передбачено проведення польових експериментальних робіт на тестових ділянках в межах агроценозів для валідації методу оцінки валової первинної продуктивності рослинного покриву та інтенсивності абсорбції вуглекислого газу з використанням наземних спектро- та газометричних зйомок та супутникових даних.

Польові роботи у звітний період проведено на дослідному полігоні ДЗЗ "Березань" у Баришівському районі Київської області. Комплекс польових робіт включав наземну оцінку потоків вуглекислого газу газоаналізатором CO650 Plant CO2 Analysis Package

(виробник Qubit Systems, Канада) та визначення низки інших параметрів рослинного покриву (рис. 9.1-9.2), зокрема надземної біомаси та вмісту вологи в рослинному покриві та ґрунті.

Роботи проводились спільно з науковцями з національного університету «Києво-Могилянська академія» (О.О. Халаїм) та Інституту ботаніки ім. М.Г.Холодного НАН України (О.В. Поліщук). Об'єктом досліджень були виробничі посіви озимої пшениці сорту Богдана, вирощені на полях Баришівської зернової компанії.

Оригінатор: Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Миронівський інститут пшениці імені В. М. Ремесла УААН.

Різновид – лютесценс. Тип розвитку – озимий. Кущ – напівпрямостоячий, рослини середньої висоти. Прапорцевий листок має помірний восковий наліт на піхві і слабке антоціанове забарвлення вушок. Соломина слабко виповнена з помірним восковим нальотом на верхньому міжвузлі та слабким опушенням опуклої поверхні верхнього вузла. Колос білого або солом'яно-жовтого кольору пірамідальної форми, довгий та нещільний з помірним восковим нальотом та наявними зубцями. Нижня колоскова луска: овальної форми, плече пряме та середньої ширини, зубець прямий і дуже короткий, опушення внутрішньої поверхні – слабке, зовнішньої – слабке. Зернівка червоного кольору, середня за довжиною та шириною, крупна. Язичок – середньої довжини, кіль на нижній квітковій лусці – наявний. Рослини заввишки 98-104 см. Зимостійкість сорту в умовах проморожування – вище середня, у польових умовах за роки випробування, зимостійкість становила 8,5-8,9 бала. Стійкість сорту до вилягання 8,7-9,0 бала. Стійкість до осипання 8,3-8,9 бала. Стійкість до посухи 8,4-8,7 бала. За роки випробування сорт слабо уражувався основними хворобами та шкідниками. Сорт інтенсивного типу. Маса 1000 зерен – 44,6-78,8 г. Середньостиглий вегетаційний період становив від 287 до 300 діб. Борошномельні та хлібопекарські показники сорту добрі та відмінні. Зерно містить 14,4% білка, клейковини – 31,7%. Сильна пшениця. Рекомендований для вирощування в зонах: Степ, Лісостеп, Полісся Агротехніка звичайна для зони вирощування. Потребує внесення оптимальних доз мінеральних добрив та проведення захисту рослин від шкідників і хвороб інсектицидами типа Карате Зеон и фунгіцидами типа Альто Супер. Сорт інтенсивного типу. Середня врожайність за роки випробування в зоні Степу – 68,7 ц/га, в зоні Лісостепу -73,4 ц/га, в зоні Полісся – 60,6 ц/га, гарантований приріст – 10,8-15.4 ц/га.

Польові виїзди з проведенням газометричних вимірів відбулися 08.04.2016 р., 28.04.2016, 10.05.2016 та 17.06.2016, що дозволило оцінити біофізичні параметри рослинного покриву озимої пшениці на різних фазах її розвитку.



Рисунок 9.1. Експериментальне визначення карбонового кругообігу в системі "атмосфера-рослинність" на полігоні ДЗЗ в Баришівському районі Київської області на полях виробничих посівів озимої пшениці Баришівської зернової компанії. Фото зроблено 08.04.2016 р.



Рисунок 9.2. Схема розташування ділянки (поле №1) експериментального визначення валової первинної продуктивності озимої пшениці сорту Богдана на дослідному полігоні ДЗЗ в Баришівському районі Київської області.

За допомогою замкненої системи для вимірювання концентрації вуглекислого газу у повітрі (Qubit Systems CO650 Plant CO2 Analysis Package, Канада) були виміряні наступні показники: а) валова (первинна) продуктивність екосистеми (GEP або GPP), б) дихання екосистеми (ER) та чистий екосистемний обмін вуглецю (NEE або NEP). Результати вимірів валової первинної продуктивності екосистеми (GEP) для поля озимої пшениці сорту Богдана та виміряні безпосередньо в полі методом зважування значення сирої біомаси надземної частини рослин озимої пшениці наведено в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1. Значення валової продуктивності екосистеми (GEP) за даними О.О. Халаїм, О.В. Поліщук.

Дата	Номер	Валова продуктивність екосистеми	Сира біомаса пагонів озимої
	поля	(GEP), мкмоль $CO_2 M^{-2}c^{-1}$	пшениці с. Богдана, г/м <sup>-2</sup>
08.04.2016	1	6,61	475,8
28.04.2016	1	12,69	1851,6
10.05.2016	1	12,90	2801,9
17.06.2016	1	14,74	4468,5

Для цих даних було проведено кореляційний аналіз значень валової первинної продуктивності ділянок поля озимої пшениці сорту Богдана за наземними газометричними вимірами та величиною нагромадженої посівом біомаси на дату проведення вимірів (рис.9.3).



Рисунок 9.3. Кореляційна залежність між наземними газометричними вимірами GEP та значеннями сирої біомаси надземної частини рослин озимої пшениці сорту Богдана в Баришівському районі Київської області.

Як бачимо, існує тісна залежність між цими двома показниками ( $R^2=0,81$ ), що є закономірним, оскільки засвоєний рослинами в процесі фотосинтезу вуглекислий газ включається в метаболічні цикли, які в кінцевому підсумку формують біологічну продуктивність досліджуваного посіву озимої пшениці.

Для встановлення взаємозв'язку наземних та супутникових даних стосовно оцінки первинної валової продуктивності (GPP) було проведено накопичення продукту MOD17A2 за період з березня по липень 2016 року Крім накопичення було проведено суміщення супутникових знімків з ділянками польових експериментальних досліджень. На рис. 9.4. показано суміщення знімку Landsat-8 (10.05.2016) з пікселами знімку MOD17A2, для яких отримано значення GPP. Червоний хрестик наведено на середину досліджуваної ділянки №1. Роботи з продуктом MOD17A2 та іншими дистанційними даними (Landsat) проводились за допомогою програмного продукту по обробці космічних даних Erdas Imagine.



Рисунок 9.4. – Суміщення космічного знімка з супутника Landsat-8 за 10.05.2016 р. (А) з пікселами продукту MOD17A2 (Б) за березень – липень 2016 року. Червоний курсор показує центр досліджуваного поля №1 озимої пшениці сорту Богдана.

Дані значень GPP за продуктом MOD17A2 для поля озимої пшениці сорту Богдана наведені в таблиці 9.2.

-	-	
Ν	Дата	GPP для поля №1,
	(2016 рік)	кг С / м <sup>2</sup> *0,0001 за 8 діб
1	13.03-20.03	11
2	21.03-28.03	22
3	29.03-05.04	78
4	06.04-13.04	121
5	14.04-21.04	204
6	22.04-29.04	250
7	30.04-07.05	220
8	08.05-15.05	322
9	16.05-23.05	344
10	24.05-31.05	306
11	01.06-08.06	456
12	09.06-16.06	218
13	17.06-24.06	337
14	25.06-02.07	424
15	03.07-10.07	414

Таблиця 9.2. Значення GPP для 8-денних серій продукту MOD17A2 для поля озимої пшениці сорту Богдана, де проводились наземні газометричні виміри.

Для чотирьох дат, на які було проведено наземні газометричні виміри, були обчислені добові значення – GPP<sub>day</sub> для досліджуваного поля за даними продукту MOD17A2 (дивись таблицю 9.3).

Таблиця 9.3. Розраховані значення GPP<sub>day</sub> (кг С / м<sup>2</sup>) за даними продукту MOD17A2 для поля озимої пшениці сорту Богдана.

N	Дата (2016 рік)	GPP <sub>day</sub> для поля №1, кг С / м <sup>2</sup>
1	08.04.2016	0,001513
2	28.04.2016	0,003125
3	10.05.2016	0,004025
4	17.06.2016	0,004213

Для порівняння валової первинної продуктивності, виміряної наземними газометричними та супутниковими методами, необхідно перевести значення GEP з розмірністю мкмоль  $CO_2 \text{ M}^{-2} \text{c}^{-1}$  в розмірність – кг C / м<sup>2</sup> на добу. Формула перерахунку:

$$GEP_{day} = 0,0864*12*GEP/1000.$$
(9.1)

Результати такого перерахунку за формулою (9.1) наведено в таблиці 9.4.

Таблиця 9.4. Розраховані значення GEP<sub>day</sub> (кг С / м<sup>2</sup>) за даними наземних газометричних вимірів для поля озимої пшениці сорту Богдана

N	Дата (2016 рік)	GEP <sub>day</sub> для поля №1, кг С / м <sup>2</sup>
1	08.04.2016	0,006854
2	28.04.2016	0,013162
3	10.05.2016	0,013376
4	17.06.2016	0,015285

Проведено кореляційний аналіз значень валової первинної продуктивності поля озимої пшениці сорту Богдана, отриманих за супутниковими даними GPP<sub>day</sub> та наземними газометричними вимірами GEP<sub>day</sub>.

Для поля №1 отримано коефіцієнт кореляції  $R^2 = 0.92$  та рівняння регресії GEP<sub>day</sub>(наземні дані, кг С / м<sup>2</sup>) = 2.862443 \* GPP<sub>day</sub>(MOD17A2, кг С / м<sup>2</sup>) + 0.002956.

Побудовані залежності наведено на рисунку 9.5.



Рисунок 9.5. Кореляційна залежність між значеннями GPP за продуктом MOD17A2 та наземними газометричними вимірами GEP для озимої пшениці сорту Богдана в Баришівському районі Київської області.

За даними з таблиці 9.3. значення GPP<sub>day</sub>, розраховані з 8-денних серій продукту MOD17A2 та для ідентифікації одиниць вимірювання маси переведені в г C/m<sup>2</sup> шляхом множення їх на 1000, були також зіставлені з нагромадженою на відповідну дату сирою біомасою пагонів рослин озимої пшениці сорту Богдана, котра наведена в табл. 9.1. Результати аналізу показано на рис. 9.6.

При порівнянні рис. 9.3 та 9.6 переконуємося, що існує тісна пряма залежність між сирою біомасою надземної частини рослин озимої пшениці сорту Богдана дослідженого виробничого посіву і виміряними показниками його валової первинної продуктивності, вираженими в об'ємах поглинутого вуглекислого газу. Причому кореляція біомаси зі супутниковими даними GPP навіть вища, ніж з прямими вимірюваннями GEP камерним методом. Імовірно це пояснюється усередненням стану посіву у достатньо великому пікселі MOD17 і більш точним врахуванням інших процесів газообміну, які фіксуються під час прямої наземної газометрії вибраної ділянки агроценозу.



Рисунок 9.6. Кореляційна залежність між значеннями GPP за продуктом MOD17A2 та значеннями сирої біомаси надземної частини рослин озимої пшениці сорту Богдана в Баришівському районі Київської області.

Отриманий високий коефіцієнт кореляції між супутниковими та наземними вимірюваннями одного і того ж показника – валової первинної продуктивності агроценозу, вираженої в однакових одиницях – є достатньо очікуваним результатом, що свідчить про добру узгодженість моделей, закладених в основу розробки продукту MOD17. Проте безпосереднє порівняння значень валової первинної продуктивності за даними наземних газометричних вимірів (GEP) та за супутниковими даними з продукту MOD17A2(GPP) показало, що наземні значення в середньому в чотири рази більші за супутникові, тобто продукт MOD17A2 дає занижені значення обсягів поглинання вуглекислого газу для дослідженого виробничого посіву озимої пшениці сорту Богдана. Це свідчить про те, що необхідно значно збільшувати як кількість наземних вимірів, так і кількість тестових полів для обґрунтування достовірності отриманих залежностей. Таким чином, необхідно продовжити подібні експериментальні полігонні дослідження з метою калібрування супутникових даних для різних типів сільськогосподарських культур в межах різних ландшафтно-кліматичних зон.

Виявлені відхилення від наземних значень продукту MOD17A2 показують необхідність його калібрування для регіональних оцінок зміни показника GPP.

Отримані результати запроваджено у "Баришівської зернової компанії".

#### 9.2. Метод оцінювання індексу листкової поверхні (LAI)

У дослідженнях рослинності, одним з основних показників активності процесів фотосинтезу є індекс листкової поверхні (Leaf Area Index - LAI). За своєю інформативністю і об'єктивністю індекс виявився одним з найбільш цінних морфоструктурних параметрів фітоценозів. Сьогодні індекс LAI широко використовується при вивченні особливостей взаємодії рослинності з атмосферою, в моделях вуглецевого циклу, при оцінюванні продуктивності лісів, розрахунках фітомаси, тощо [222-224]. Також він може бути індикатором стану рослинності при оцінках впливу атмосферного аерозолю.

На сьогодні розроблено багато методів дистанційного оцінювання LAI. Однак усім їм притаманні такі основні недоліки: 1) більшість багатоспектральних космічних знімків, на які орієнтуються відомі методи дистанційного оцінювання LAI, мають відносно невисоку просторову розрізненність; 2) майже всі оцінки LAI базуються на сигналах, відбитих лише верхнім шаром рослинності без врахування впливу рослинності нижніх ярусів фітоценозу; 3) LAI оцінюється, з використанням даних лише з однієї стадії сезонного розвитку (в основному з червня по серпень – період максимальної продуктивності більшості листопадних фітоценозів).[225, 226]

Методи визначення індексу листкової поверхні за дистанційними даними, які існують на даний час у світі можуть бути значно покращені, якщо враховуватимуть специфічні структурні та фенологічні особливості лісових рослинних угруповань.

У зв'язку цим, актуальним став розроблений нами раніше дистанційний метод оцінювання LAI лісових фітоценозів для різних ландшафтно-кліматичних зон України [227-229].

Для валідації методу оцінювання LAI на основі багатоспектральних космічних знімків середньої просторової розрізненності протягом вегетаційного періоду проведено (квітень - жовтень) польові завіркові роботи у межах лісових фітоценозів.

З метою забезпечення регулярних наземних вимірювань LAI впродовж семи місяців, в межах Голосіївського національного природного парку (НПП) було обрано шість тестових ділянок з лісовими фітоценозами, типовими для Київської області (рис. 9.7).



Рисунок 9.7. Картосхема розташування тестових ділянок обраних типових лісових фітоценозів в межах Голосіївського НПП

В ході польових досліджень вимірювалися величини LAI чистих соснових та грабових фітоценозів, а також змішаних дубово-соснових, дубово-грабових та букових фітоценозів. При закладанні тестових ділянок враховано вік деревостанів та зімкненість крон.

Наземні вимірювання LAI проводилися на основі обчислень за напівсферичними фотографіями картини розподілу світла під пологом дерев. Спосіб DHP (Digital Hemispherical Photography) надає можливість отримати цифрове фотографічне зображення з наочною цілісною картиною розташування, форми і розмірів прогалин у листві дерева (рис. 9.8, А, Б). 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, використовується цифрова фотокамера з об'єктивом "риб'яче око" (останній забезпечує кут поля зору у 180 градусів). Обчислення LAI здійснювалися у програмному

середовищі GLA за відповідними DHP зображення кожної тестової точки у певний період фенологічного розвитку фітоценозу (рис. 9.8, В).



Рисунок 9.8. Приклад DHP зображень: А – листяних, і Б - хвойних фітоценозів та їхньої обробки у програмному продукті GLA, В

В якості тестових було відібрано однорідні ділянки досліджуваних фітоценозів розміром 30х30 м. Розмір ділянки визначався відповідно до просторової розрізненності космічних знімків Landsat-8 (OLI), за якими на основі запропонованого методу здійснювалися дистанційні обчислення LAI. В межах тестових ділянок LAI вимірювався у п'яти точках, розташованих за схемою, представленою на рис. 9.9.



Рисунок 9.9. Схема тестової ділянки

Для подальших обчислень результати вимірювань у кожній ділянці було усереднено. Результати польових вимірювань наведено у таблиці 9.5.

. 1			-	L .		
	1CL0	2DL0	3ML0	4DL0	5DL0	6FL0
24.04.16	0.964	1.484	1.884	1.782	1.596	1.266
10.05.16	0.920	1.768	1.980	1.922	2.166	1.932
01.06.16	0.814	1.698	1.920	1.610	1.662	1.606
15.07.16	0.976	1.720	2.046	1.344	1.642	1.466
05.08.16	0.990	1.640	1.880	1.590	1.740	1.398
17.08.16	1.034	1.270	1.464	1.476	1.286	1.056
07.09.16	0.904	1.262	1.536	1.272	1.292	1.146
20.09.16	1.030	1.266	1.460	1.150	1.384	1.088

Таблиця 9.5. Усередненні дані польових вимірювань індексу листової поверхні LAI<sub>GR</sub>

	25.10.16	0.790	0.898	1.234	0.592	0.978	0.898
--	----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Для охоплення основних фаз фенологічного розвитку фітоценозів було здійснено польові виїзди у такі дні: 08.04.2016, 24.04.2016, 10.05.2016, 01.06.2016, 24.06.2016, 15.07.2016, 05.08.2016 р., 17.08.2016 р., 07.09.2016 р., 20.09.2016 р., 25.10.2016 р.

Графік польових вимірювань формувався згідно календаря отримання знімків Landsat-8 (OLI) на обрану територію дослідження, доступний через веб портал Геологічної служби США (http://landsat.usgs.gov/tools\_L8\_acquisition\_calendar.php). Оскільки хмарність району досліджень мала не перевищувати 5%, із 27 доступних знімків на визначений період придатним для здійснення обчислень виявилися лише 9. Забезпеченість космічними знімками відображено на рис. 9.10.



Рисунок 9.10. - Космічні знімки Landsat-8 (OLI) на територію дослідження (Path/Row: 181/25) відібрані для аналізу за вегетаційний період.

Вихідні знімки підлягали радіометричному та атмосферному коригуванню, після чого були отримані значення коефіцієнту відбиття ТОА (Top of atmosphere reflectance). Всі знімки були попіксельно суміщені та обрізані в межах території досліджень.



Рисунок 9.11. Фрагмент каліброваного багатоспектрального зображення знімка Landsat8/OLI за 13 липня 2016 року.

Для кожного знімку було розраховано нормалізовано-різницевий вегетаційний індекс за даними червоного та ближнього інфрачервоного каналу. За попередньо отриманою регресійною залежністю було проведено перерахунок NDVI-LAI у середовищі Scilab. Результати розрахунків за космічним знімком за 13 липня 2016 року проілюстровано на рис. 9.12.



Рисунок 9.12. Результати розрахунків а) ввегетаційного індексу NDVI та б) індексу листової поверхні за фрагментом багатоспектрального зображення знімка Landsat8/OLI (13 липня 2016 р.)

Значення LAI<sub>RS</sub>, отримані за даними космічних знімків Landsat-8 (OLI) наведено у таблиці 9.6.

	1CL0	2DL0	3ML0	4DL0	5DL0	6FL0
08.04.16	0.338	0.282	0.349	0.312	0.235	0.277
10.05.16	1.500	2.116	2.001	2.123	2.090	2.125
26.05.16	1.670	2.121	2.026	2.114	2.114	2.107
13.07.16	1.953	2.134	2.097	2.124	2.163	2.122
05.08.16	1.951	2.091	1.991	2.079	2.110	2.084
14.08.16	1.078	2.098	2.054	2.096	2.147	2.108
21.08.16	1.913	2.108	2.013	2.105	2.129	2.090
15.09.16	1.589	1.980	1.930	1.998	2.068	2.003
17.10.16	1.070	1.165	1.293	1.237	1.032	1.042

Таблиця 9.6. Значення LAI<sub>RS</sub>, отримані за даними космічних знімків Landsat8

Середнє значення та процент відхилення *К* даних за супутниковими знімками від даних польових вимірювань по кожній ділянці досліджень за формулами:

$$K = LAI_{RS} - LAI_{GR} \tag{9.2}$$

де LAI<sub>RS</sub> – значення індексу листової поверхні, отримані за даними космічних знімків Landsat8, а LAI<sub>GR</sub> - дані польових вимірювань індексу листової поверхні.

$$K_{mean} = \sum_{n}^{1} K / n \tag{9.3}$$

де n – кількість досліджуваних пар польових та дистанційних даних.

	1CL0	2DL0	3ML0	4DL0	5DL0	6FL0
1	-0.63	-1.20	-1.53	-1.47	-1.36	-0.99
2	0.58	0.35	0.02	0.20	-0.08	0.19
3	0.86	0.42	0.11	0.50	0.45	0.50
4	0.98	0.41	0.05	0.78	0.52	0.66
5	0.96	0.45	0.11	0.49	0.37	0.69
6	0.04	0.83	0.59	0.62	0.86	1.05
7	1.01	0.85	0.48	0.83	0.84	0.94
8	0.56	0.71	0.47	0.85	0.68	0.91
9	0.28	0.27	0.06	0.65	0.05	0.14

Таблиця 9.7. Різниця (К) значень LAI за дистанційними та наземними даними

Таблиця 9.8. Середнє значення та процент відхилення *K* даних за супутниковими знімками від даних польових вимірювань по кожній ділянці досліджень.

	K <sub>mean</sub>	$K_{\%}$
1CL0	0.52	56.2 %
2DL0	0.34	25.9 %
3ML0	0.04	4.7 %
4DL0	0.38	37.6 %
5DL0	0.26	19.8 %
6FL0	0.34	24.9 %

Середнє відхилення (похибка) вимірювань за період досліджень склала 22,3%. Результати валідації свідчать про здатність розробленого методу належно оцінювати LAI на основі космічних знімків середньої просторової розрізненності. Найкраще за даним методом оцінюються мішані, зімкнені лісові угруповання з добре розвиненим другим ярусом (3ML0). Також прийнятні відхилення від реальних значень спостерігаються на ділянках щільних, переважно однорідних деревостанів листяних порід з розвиненим підліском (5DL0, 6FL0, 2DL0). Гірші значення демонструють ділянки з нещільною кроною або великими прогалинами у ній. Найгірше за представленим методом оцінюється LAI чистих хвойних деревостани з щільним трав'яним покривом.

### 10. Валідація методів дистанційного оцінювання фізичних характеристик земної поверхні при оцінках впливу атмосферного аерозолю на стан природного середовища

В ході проведення валідації запропонованих методів дистанційного оцінювання фізичних характеристик земної поверхні перевірено якість оцінювання зволоження та температури земних поверхонь. Обидві характеристики мають важливе значення при оцінках впливу атмосферного аерозолю на стан природного середовища.

#### 10.1. Метод оцінки зволоження земного покриву

Була проведена валідація методу оцінки зволоження земного покриву, де у якості індикатора, що характеризує стан зволоження земного покриття та водообмін у верхньому шарі грунту, запропоновано використання водного індексу NWI, що розраховується на основі нормованої різниці спектрального відбиття в зеленій та середній інфрачервоній смугах спектра багатоспектральних супутникових даних. При цьому використовувались новітні супутникові дані Sentinel-2.

Польові виїзди на дослідний полігоні ДЗЗ в Баришівському районі Київської області (див. рис. 10.1) з проведенням відбору проб на вологість для валідації супутникових даних відбулися 08.04.2016 р., 28.04.2016, 10.05.2016 та 17.06.2016, що дозволило виконати зіставлення розрахованого індексу NWI за даними Sentinel-2 з наземними вимірами.

Данні польових робіт:	Данні космічної зйомки
Дати польових вимірів	Супутникові знімки Sentinel:
08/04/2016	07/04/2016
28/04/2016	08/04/2016
10/05/2016	28/04/2016
17/06/2016	01/05/2016
11/07/2016	13/05/2016
	17/06/2016
	17/07/2016
	Супутникові знімки Landsat:
	16/03/2016
	08/04/2016
	10/05/2016

Таблиця 10.1. Дані польових вимірів та даних супутникової зйомки

З метою виконання даної роботи були накопичені знімки Sentinel-2 на наступні дати: 08.04.2016 р., 28.04.1016, 17.06.2016 та 17.07.2016. Зокрема, на рис. 10.1 показано загальний вигляд знімку Sentinel-2 (08.04.2016) та його збільшене зображення для дослідного полігону ДЗЗ в Баришівському районі Київської області.

Один знімок Sentinel-2 в архівованому стані займає ~ 7,3Гб. Зважаючи на такий великий об'єм даних, один знімок Sentinel-2 підрозділяється на 15 сцен. Для території дослідження була обрана сцена ТЗ6UUA, яка повністю закриває досліджувану площу. Для зберігання такої сцени потребується ~ 1,5 Гб в форматі "\*.img".



Рисунок 10.1. Загальний вигляд знімка Sentinel-2(08.04.2016) та його збільшене зображення для дослідного полігону ДЗЗ в Баришівському районі Київської області

Для зйомки Sentinel-2 формула розрахунку Normalized Water Index NWI набуває вигляду:

$$NWI = \frac{GR(3) - SWIR(12)}{GR(3) + SWIR(12)},$$
(10.1)

де GR(3) - спектральне відбиття в діапазоні довжини хвиль 540-580 нм, що відповідає зеленому спектральному каналу (канал 3) зйомки Sentinel-2;

SWIR(12) - спектральне відбиття в діапазоні довжини хвиль 1570-1660 нм, що відповідає середньому інфрачервоному каналу (канал 12) зйомки Sentinel-2.

Значення нормалізованого водного індексу були розраховані за допомогою програмного забезпечення Erdas Imagine.



Рисунок 10.2. Ділянка, обрана для дослідження вологості ґрунту

Вологість ґрунту визначалася термостатно-ваговим методом, заснованим на висушуванні та важенні зразків ґрунту.

У лабораторії вологий ґрунт, який був відібраний на ділянках під час польових робот спочатку важать у бюксі та сушать у сушильній шафі при температурі 105° протягом не менш ніж 6 годин до постійної ваги. Далі важать висушений ґрунт у бюксі.

Вологість ґрунту визначається за формулою:

$$\beta_{B} = \frac{B1 - B2}{B2 - B} * 100, \% \text{ M.C.} \Pi$$
(10.2)

де  $\beta_{\scriptscriptstyle B}$  – вологість ґрунту, % від маси сухого ґрунту;

B- маса пустого бюксу, г;

В1 – маса бюксу з вологим ґрунтом до сушки, г;

В2 – маса бюксу з сухим ґрунтом після сушки, г.

Результати польових досліджень та отримані значення вологості грунту,

розраховані за формулою (10.2) наведені в таблиці 10.2.

Таблиця 10.2. Таблиця визначення вмісту гігроскопічної води в ґрунтовому покриві на дату 08.04.2016

Ґрунт (місце відбору)	№ бюксу	Вага сухого бюксу	Навіска воздушно – сухого ґрунту	Вага бюксу з ґрунтом після сушки	Вага висушеного грунту	Вага води	%H <sub>2</sub> O
Т. 306 342/2 Біомаса. Волога 5 см від поверхні 1 повт. 50 21 20.29 N 31 36 12.55 Е	б. 233 к. 233	22.3	70.4- 22.3= 48.1	63.9	63.9-22.3= 41.6	48.1- 41,6= 6.5	6.5*100/41,6= 15.625%

Продовження таблиці 10.2

Т. 306. 342/2 Біомаса. Волога 20 см від поверхні 50 21 20.29 N 31 36 12.55 Е	б. 008 к. 028	21.0	80.0- 21.0= 59.0	72.3	72.3-21.0= 51.3	59.0- 51,3= 7.7	7.7*100/51,3= 15.009%
Т. 306 342/2 Волога 5 см від поверхні 2 повтор 50 21 20.29 N 31 36 12.55 Е	б. 006 к. 006	21.5	73.2- 21.5= 51.7	69.0	69.0- 21,5= 47.5	51.7- 47,5= 4.2	4.2*100/47,5= 8.842%
Т. 306 342/2 Волога 20 см від поверхні 2 повтор 50 21 20.29 N 31 36 12.55 Е	б. 377 к. 008	22.0	83.1-22.0= 61.1	74.0	74.0- 22,0= 52.0	61.1- 52,0= 9.1	9.1*100/52,0= 17.5%
т. 307.	б. 392	21.7	74.7-21.7=	66.6	66.6-21,7=	53.0-	8.1*100/44,9=

Водорозділ	к. 005		53.0		44.9	44,9=	18.040%
50 21 09.16 N						8.1	
31 36 05.49 E							
<ul> <li>Т. 307</li> <li>Волога 20 см</li> <li>від поверхні</li> <li>Под.</li> <li>Водорозділ</li> <li>50 21 09.16 N</li> <li>31 36 05.49 Е</li> </ul>	б. 390 к. 014	22.1	68.7-22.1= 46.6	63.5	63.5-22,1= 41.4	46.6- 41,4= 5.2	5.2*100/41,4= 12.560%
т. 308 45 м від центра Волога 5 см від поверхні Под. Схил 50 21 07.49 N 31 36 06.11 Е	б. 394 к. 212	22.2	71.3-22.2= 49.1	66.0	66.0- 22,2= 43.8	49.1- 43,8= 5.3	5.3*100/43,8= 12.100%
<ul> <li>Т. 308</li> <li>Волога 20 см</li> <li>від поверхні</li> <li>Под. Схил</li> <li>50 21 07.49 N</li> <li>31 36 06.11 Е</li> </ul>	б.255 к. 390	22.8	82.0- 22.8= 59.2	74.3	74.3-22,8= 51.5	59.2- 51,5= 7.7	7.7*100/51,5= 14.951
т. 309 15 м от пода Волога 5 см від поверхні Край пода. 50 21 06.49 N 31 36 06.49 Е	б.368	22.4	85.0- 22.4= 62.6	73.7	73.7- 22,4= 51.3	62.6- 51,3= 11.3	11.3*100/51,3= 22.027%
<ul> <li>Т. 309</li> <li>Волога 20 см</li> <li>від поверхні</li> <li>Край пода.</li> <li>50 21 06.49 N</li> <li>31 36 06.49 Е</li> </ul>	б. 10 к. 385	21.6	66.0- 21.6= 44.4	59.7	59.7- 21,6= 38.1	44.4- 38,1= 6.3	6.3*100/38,1= 16.535%
т. 310 Волога 5 см від поверхні Под. Центр. 50 21 06.05 N 31 36 06.74 Е	б. 374	22.2	88.7- 22.2= 66.5	77.2	77.2- 22,2= 55.0	66.5- 55,0= 11.5	11.5*100/55,0= 20.909%
					Пр	одовження	а таблиці 10.2
<ul> <li>Т. 310</li> <li>Волога 20 см</li> <li>від поверхні</li> <li>Под. Центр.</li> <li>50 21 06.05 N</li> <li>31 36 06.74 Е</li> </ul>	б. 023 к. 393	22.1	68.3-22.1= 46.2	61.8	61.8-22,1= 39.7	46.2- 39,7= 6.5	6.5*100/39,7= 16.372%
т. 318	б. 400	22.3	68.0- 22.3= 45.7	63.8	63.8-22,3= 41.5	45.7- 41,5= 4.2	4.2*100/41,5= 10.120
T. 319	б. 382	22.2	77.6-22.2=	74.3	74.3-22,2= 52.1	55.4- 52,1= 3.3	3.3*100/52,1= 6.333%
T. 320	б. 019	21.5	72.0- 21.5= 50.5	65.3	65.3-21,5= 43.8	50.5- 43,8= 6.7	6.7*100/43,8= 15.296
T. 321	б. 375	22.3	91.9-22.3= 69.9	87.1	87.1-22,3= 64.8	69.9- 64,8=	5.1*100/64,8= 7.870

			5.1	

Таблиці визначення вмісту гігроскопічної води в грунтовому покриві були побудовані для кожного експериментального виїзду на 08.04.2016 р., 28.04.2016, 10.05.2016 та 17.06.2016 р. Використовуючи розрахункові значення відсотку вологості грунтової поверхні для 4 дат польових досліджень, було побудовано розподіл значень на водорозділі, границі поду та водорозділу, схилу та у центрі мікрозападин. Наведені результати представлені на рисунку 10.3.



Рисунок 10.3. Відображення вологості ґрунтового покриву на водорозділі, границі поду та водорозділу, схилі та у центрі поду за періодами: 08.04.2016, 28.04.2016, 10.05.2016, 17.06.2016.

Найвологіший період за даними гідрометеостанції Яготин був на початку травня. Вологість грунту з центру мікрозападини, відібраного 10.05.16, становить 38% на водорозділі 24%. Найсухіший період – середина червня, тут стан вологості грунту, відібраного 17.06.2016р., становить 21% у центрі мікрозападини і 11% на водорозділі. У першій половині липня на території спостерігалася велика кількість опадів. Відібрані проби на водорозділі показали 11% вологості, центр мікрозападин був залитий водою, що становить 100% вологості грунтового покриву.

За допомогою програми Grapher 3 було проведено лінійну кореляцію між експериментальними даними вологості грунтової поверхні та значеннями водного індексу, розрахованого за формулою 10.1.

Отримано кореляційні залежності між значення вологості в грунті та індексом NWI на рівні r<sup>2</sup>=0.8, що дозволяє проводити оцінку розподілу зволоженості відкритого грунтового покриву за даними Sentinel-2 за умови калібрування залежностей, використовуючи наземні завіркові дані.

Крім того, для тестового полігону за даними Sentinel-2 виконано аналіз розподілу мікрозападинних форм рельєфу, що в лісостеповій зоні України можуть займати значні площі і впливати на водний режим території, вміст аерозолів в приповерхневому шарі атмосфері, а також на тип ґрунту та рослинність. Найбільші проблеми процеси утворення мікрозападин складають аграрному сектору країни, впливаючи на врожайність посівів та родючість ґрунту. Вода, що довго перебуває у мікрозападинних формах рельєфу веде до заболочування ґрунту, затримки росту рослин та зміни типу рослинності у межах пониження. Ґрунт у центрі поду з часом заболочується, що призводить до появи нових рослин болотного типу: очерет (Scírpus), молочай болотний (euphorbiapalustris), а також до різного роду мхів (Bryophyta).

Для дати 28 квітня 2016 року було побудовано графік залежності індексу NWI від вологості ґрунту (див. рис. 10.4).



Рисунок 10.4. Графік розподілу між вологістю грунтової поверхні за 28 квітня 2016 року та індексом NWI, розрахованим за даними з супутника Sentinel-2 (28 квітня 2016 р).

Значення відсотка вмісту вологості грунтового покриву у центрі мікрозападин та на водорозділі значно відрізняються, це добре видно на рисунку 10.4 де утворились 2 групи точок. Сукупність точок мікрозападин згруповані та мають показники індексу NWI в межах -0.6 – -0.55, що значно менше за значення індексу NWI для точок на водорозділі.

За даними на рисунку 10.4 можна побачити, що як правило вологість у центрі мікрозападини в середньому на 8% вища за вологість ґрунту на водорозділі.

Для даних за 08 квітня 2016 року було проведено кореляційний аналіз між вологістю в ґрунтовому покриву та індексом NWI, розрахованим за даними з супутника Sentinel-2 (08 квітня 2016 р). Результати дослідження наведені на рисунку 10.5.



Рисунок 10.5. Графік залежності між вологістю в грунтовому покриву за 08 квітня 2016 р та індексом NWI, розрахованим за даними з супутника Sentinel-2 (08 квітня 2016

року)

На рисунку 10.5 відображено лінійну та поліноміальну кореляцію між значеннями вологості ґрунтової поверхні та індексу NWI.

При лінійний кореляції, отримано коефіцієнт кореляції *r*<sup>2</sup>=0,56, а рівняння має наступний вигляд:

Y = 0.8092119397 \* X - 0.5493558165,(10.3)

де, Y – значення водного індексу NWI,

X- вологість ґрунтового покриву у %

При поліноміальній кореляції, коефіцієнт кореляції *r*<sup>2</sup>=0,99, а рівняння має наступний вигляд:

 $Y = 0.1356378019 - 7.565442129 * X + 24.4355095 * X^{2}$ (10.4)

Графік рівняння кореляції другого ступеня відображено на рисунку 10.5 синім кольором.

Отже, в результаті проведеної валідації отримано розподіл вологості ґрунтового покриву полів Баришівського району Київської області по експериментальним даним та даним супутникової зйомки, виявлено кореляційні залежності між значення вологості в грунті та індексом NWI на рівні  $r^2=0.8$ , що дозволяє проводити оцінку розподілу зволоженості відкритого грунтового покриву за даними Sentinel-2 за умови калібрування залежностей, використовуючи наземні завіркові дані.

Розроблена методика оцінки вологості грунту може бути використана у дослідженнях впливу атмосферного аерозолю на стан природного середовища.

Одержані результати було запроваджено у "Баришівській зерновій компанії".

# 10.2. Алгоритм визначення температури земних поверхонь та коефіцієнтів теплового випромінювання

Моніторинг теплового поля Землі – важлива складова геоекологічного моніторингу, яка забезпечує інформацією про рівень теплового навантаження на природне або урбанізоване середовище. На основі теплового моніторингу можливе виконання різних оцінок: динаміки змін землекористування, ефективності озеленення міст, вплив на здоров'я населення та інші [227].

Важливість теплового моніторингу земної поверхні обумовлено значними площами та високою концентрацією об'єктів та поверхонь, здатних акумулювати енергію сонячного випромінювання та в процесі теплообміну із атмосферним повітрям здійснювати значний вплив на мікроклімат. Серед найбільш поширених типів земних поверхонь із високою теплопоглинальною здатністю виділяються асфальтові покриття (дороги, міські майданчики, тротуари), цегляні, бетонні, оштукатурені стіни будівель, покрівельні покриття (руберойд, листовий метал, шифер), відкриті грунти та піски.

Дані поверхні впродовж сонячного дня активно накопичують тепло, яке впродовж ночі віддається навколишньому повітрю, постійно утримуючи його температуру вищою за температуру повітря за межами міста, там самим впливаючи на формування міських «островів тепла» [230]. Окрім поверхонь, що накопичують тепло для урбанізованого середовища характерна велика кількість техногенних об'єктів, які генерують тепло під час своєї активності: автомобілі, незадовільно ізольовані тепломережі, об'єкти енергетичної промисловості, виробнича інфраструктура та ін.

Описані властивості різних типів поверхонь та земних покривів вимагають детального дослідження з метою опису їх впливу на мікроклімат середовища, динаміки формування теплового поля та формування стратегій і рекомендацій для поліпшення умов проживання, праці населення та зниження негативного впливу на здоров'я населення та навколишнє середовище. Сучасні засоби дистанційного зондування Землі дозволяють отримувати періодичні геопросторові дані теплового діапазону середньої просторової розрізненності, які є основним інструментом дослідження теплових полів.

Постійне розширення урбанізованих територій вимагає виконання теплового моніторингу для контролю та прогнозування стану цих територій та уникнення формування шкідливих для здоров'я людей та екологічного стану прилеглих територій умов. Таким чином, прицезійне відновлення температур поверхонь та об'єктів урбанізованих територій є найбільш прийнятним інструментом для цієї задачі.

На даний час основним джерелом даних про теплові поля земної поверхні виступають супутникові зображення, що одержується у тепловому діапазоні електромагнітного випромінювання 8-13 мкм. Наразі доступні інфрачервоні зображення супутникових систем серії Landsat (5, 7, 8), які безкоштовно поширюються через вебресурси Геологічної служби Сполучених Штатів Америки (USGS). Інфрачервоні зображення сенсорів TM та ETM+ супутників Landsat-5 та Landsat-7 мають просторову розрізненність 60 м, а дводіапазонні зображення сенсора TIRS супутника Landsat-8 – просторову розрізненність 100 м. Усі зазначені зображення інтерпольовано до дискретизації 30 м, що забезпечує можливість їх попіксельного суміщення із зображеннями інших спектральних діапазонів цих супутникових систем. На сьогоднішній день активним є лише Landsat-8.

Періодичність знімання однієї території складає 16 днів, а для деяких територій в залежності від площ перекриття зображень сусідніх орбіт проходження супутника – 8 днів.

Матеріали знімання супутникових систем серії Landsat постачаються у вигляді набору окремих зображень формату GeoTIFF та метаданих до них. Зображення попередньо радіометрично відкалібровано та геореференціювано.

Інформативним продуктом обробки даних знімання в дальньому інфрачервоному діапазоні є растрові карти температури земної поверхні. Для отримання цього продукту необхідно виконати спеціальну обробку інфрачервоних зображень, яка включає перерахунок цифрових значень пікселів зображення на спектральну щільність енергетичної яскравості на сенсорі (радіометричне калібрування), усунення впливу атмосфери на випромінювання шляхом застосування моделей радіаційного переносу теплового випромінювання атмосферою, розрахунок та застосування додаткових величин, необхідних для розрахунку температури за значеннями спектральної щільності енергетичної яскравості – коефіцієнтів теплового випромінювання найбільш характерних типів поверхонь, апаратних констант та ін., розрахунок значення фізичної температури поверхні за оберненою формулою Планка [231].

Модель визначення температури земної поверхні за даними інфрачервоного знімання системам Landsat Дані інфрачервоного знімання супутникових систем Landsat подаються у піксельних цілочисельних значеннях *DN* градуюваної спектральної щільності енергетичної яскравості кожного піксела з кодуванням 8 біт для сенсорів TM та ETM+ або 16 біт для сенсорів OLI та TIRS. Для розрахунку температури застосовуються зображення дальнього інфрачервоного діапазону. Для сенсорів TM та ETM+ це діапазон № 6, для сенсора TIRS – діапазони № 10 та 11. Таким чином, безрозмірним значенням яскравості надається фізичний зміст.

Першим етапом обробки даних інфрачервоного знімання є перерахунок цілочисельних значень пікселів у величину спектральної щільності енергетичної яскравості на апертурі сенсора *L* за лінійною залежністю:

$$L = a \cdot DN + b \,, \tag{10.4}$$

де *a* і *b* – калібрувальні константи підсилення та зміщення.

Калібрувальні константи є визначеними та разом із робочими діапазонами супутникових інфрачервоних знімальних систем вказані в таблиці 10.3. [232].

Інфрачервоний сенсор	Робочий спектральний діапазон, мкм	Підсилення (gain), Вт/(м <sup>2</sup> ·мкм·ср)/DN	Зміщення (bias), Вт/(м <sup>2</sup> ·мкм·ср)
TM	6 (10,4 – 12,5)	0,055	1,18243
ETM+	6-1 (10,4 - 12,5)	0,067	-0,06709
	6-2 (10,4 - 12,5)	0,037	3,1628
TIRS	10 (10,6 – 11,19)	0,0003342	0,1
1105	11 (11,5 - 12,51)	0,0003342	0,1

Таблиця 10.3. Робочі спектральні діапазони та калібрувальні константи інфрачервоних сенсорів супутникових систем серії Landsat

Отримані значення спектральної щільності енергетичної яскравості на апертурі сенсора є основою для наступного розрахунку фізичної температури. Наступним етапом визначення температури є усунення впливу на інфрачервоне випромінювання атмосфери Землі. Зважені складові частини атмосферного повітря, зважені частинки, пил, волога, газові домішки здійснюють відбиття, поглинання та розсіювання електромагнітного випромінювання.

Озоновий шар затримує близько 20% інфрачервоного теплового випромінювання Землі, створюючи сприятливі умови для її теплового режиму. В системі «атмосфера підстилаюча поверхня» циркулює більша кількість енергії, ніж приходить від Сонця. Це відбувається через парниковий ефект, обумовлений наявністю в повітрі молекул, що поглинають висхідне теплове випромінювання. Головним поглиначем теплового випромінювання Сонця і земної поверхні є вода у вигляді пари і хмар (потужні хмари при поглинанні і зворотній емісії теплової радіації діють приблизно як абсолютно чорні тіла). Коливально-обертальні смуги в спектрі пари води зумовлюють майже повне поглинання випромінювання з довжинами хвиль менше 7,6 мкм, а обертальні смуги блокують інтервал спектра з довжинами хвиль більше 17 мкм. Між цими межами, а також в діапазоні 3,5-4,5 мкм, знаходяться вікна прозорості в спектрі поглинання водяної пари. Аерозолі, в залежності від розміру і складу частинок, вносять істотний внесок в відбиття, розсіювання і поглинання короткохвильової радіації Сонця та висхідного потоку теплового випромінювання поверхні Землі [233].

Для найбільш точної оцінки впливу атмосфери на теплове випромінювання необхідне врахування як мінімум трьох параметрів: коефіцієнт пропускання атмосферою випромінювання заданої довжини, спектральна щільність енергетичної яскравості нисхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі.

Тому для дальнього інфрачервоного діапазону створена велика кількість моделей радіаційного переносу випромінювання, які усувають вплив атмосфери на отримані дані. В цьому дослідженні використовується модель радіаційного переносу вигляду:

$$L_0 = \frac{L - L^{\uparrow}}{\varepsilon \tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L^{\downarrow}, \qquad (10.5)$$

де  $L_0$  – спектральна щільність енергетичної яскравості земної поверхні,  $L^{\uparrow}$  – значення коригування спектральної щільності енергетичної яскравості висхідного випромінювання в напрямку сенсора,  $L^{\downarrow}$  – значення коригування спектральної щільності енергетичної яскравості низхідного випромінювання в напрямку поверхні Землі,  $\tau$  – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери,  $\varepsilon$  – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні [234].

Результати експериментального визначення спектральних параметрів атмосфери  $L^{\uparrow}, L^{\downarrow}$  та  $\tau$  представлені на рис. 10.6 [235].



Рисунок 10.6. Спектральний розподіл атмосферних параметрів  $L^{\uparrow}, L^{\downarrow}$  та  $\tau$ 

Дана модель є узагальненою, і не враховує конкретні умови, при яких виконується знімання (географічне положення території, температура повітря, вологість, атмосферний тиск). Для отримання більш точних атмосферних параметрів, що враховують вищезгадані характеристики атмосфери, фахівцями NASA розроблено спеціалізований калькулятор для атмосферної корекції інфрачервоних зображень супутникових систем серії Landsat [236].

Попіксельний розрахунок температури земної поверхні *T* за інфрачервоним зображенням виконується через спектральну щільність енергетичної яскравості за оберненою формулою Планка:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{\varepsilon c_1}{\lambda^5 L_0} + 1\right)},$$
(10.6)

де  $c_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup> та  $c_2 = \frac{hc}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2}$  м·К – перша і друга постійні закону Планка,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постійна Планка,  $c = 2,998 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі,  $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана,  $\lambda$  – довжина хвилі електромагнітного випромінювання [217].

Для визначення температури та дійсного значення спектральної щільності енергетичної яскравості земної поверхні враховується коефіцієнт теплового випромінювання досліджуваної поверхні – власна характеристика об'єкта, що описує здатність поглинати падаюче теплове випромінювання у порівнянні із абсолютно чорним тілом (гіпотетичним об'єктом, який поглинає усе падаюче випромінювання без відбиття). Таким чином, основною проблемою при визначенні температури земної поверхні по супутниковим зображенням далекого інфрачервоного діапазону виступає невизначеність коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні. Дана невизначеність робить задачу розрахунку термодинамічної температури математично некоректною: кількість невідомих в рівняннях радіаційного переносу завжди на одиницю перевищує кількість рівнянь в системі [237].

### Модель визначення коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні за даними супутникових систем Landsat та інструментальним методом

Прицезійне визначення коефіцієнтів теплового випромінювання усіх поверхонь досліджуваної території є пріоритетною задачею при визначенні температури за даними інфрачервоного знімання, оскільки малі відхилення його значення від реального можуть привести до значних похибки розрахунку.

Існує два підходи до визначення коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні. Перший представляє собою застосування табличних значень коефіцієнтів, які надаються спеціальними довідниками [238] та спектральними бібліотеками. Другий спосіб – безпосереднє визначення коефіцієнта теплового випромінювання досліджуваної поверхні за допомогою пірометричних або тепловізійних засобів у сукупності із контактним визначенням температури поверхні шляхом підбору його значення, при якому температури прямого і дистанційного вимірювання будуть рівні. Сукупне застосування обох методів дозволяє отримати більш точні результати. Цей підхід застосовується у випадку вимірювання температури штучних поверхонь та відкритих ґрунтів.

Слід зазначити, що застосування довідкових таблиць коефіцієнтів теплового випромінювання ускладнюється тим, що в них внесені коефіцієнти еталонних матеріалів без врахування багатьох факторів, таких як їх рельєф, забрудненість поверхні, наявність вкраплень інших матеріалів (наприклад, на поверхні асфальту), які значним чином впливають на коефіцієнт теплового випромінювання.

У реальних умовах значення коефіцієнта теплового випромінювання залежить від наступних факторів:

1) матеріалу, з якого складається об'єкт (метал, пластик, вода, скло і т.д.) і його агрегатного стану;

2) характеру поверхні об'єкта (блискуча, гладка, шорстка);

3) температури об'єкта;

4) спектру (області довжин хвиль), в якому проводяться вимірювання температури;5) кута візування об'єкта.

Таким чином. створення зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання розділяється на два етапи: побудова розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання поверхонь, вкритих рослинністю, та для всіх інших типів поверхонь. На основі мультиспектральних даних Landsat виконується розрахунок вегетаційного індексу NDVI та на основі опорного значення його нижньої межі, відділяються поверхні вкриті рослинністю від всіх інших (зазвичай за опорне значення приймається показник 0,2) і, відповідно, поверхні із індексом NDVI вищий за опорне вважаються поверхнями, вкритими рослинністю і для них виконується описана далі послідовність дій. Рослинність має порівняно високий коефіцієнт теплового випромінювання, який залежить від відношення проективної площі рослинності до повної площі відкритого ґрунту F, яку можливо оцінити через поточне значення нормалізованого вегетаційного індексу NDVI [239]:

$$F \cong \left(\frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_1 - NDVI_0}\right)^2,$$
(10.7)

де *NDVI*<sub>0</sub> – максимальне значення нормалізованого вегетаційного індексу відкритого грунту (або іншій поверхні, де повністю відсутня рослинність); *NDVI*<sub>1</sub> – мінімальне значення нормалізованого вегетаційного індексу поверхні, повністю покритою рослинністю.

Далі проводиться розрахунок сумарного коефіцієнта теплового відбиття для змішаних поверхонь:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 F + \varepsilon_0 (1 - F) + \Delta \varepsilon , \qquad (2.7)$$

де  $\varepsilon_0$  та  $\varepsilon_1$  – бібліотечні спектральні коефіцієнти теплового випромінювання відкритого грунту та рослинності відповідно;  $\Delta \varepsilon$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність відображення шорсткою поверхні (стандартне значення для шорсткої поверхні в дальньому інфрачервоному діапазоні  $\Delta \varepsilon \approx 0,005$ ).

Після визначення коефіцієнта теплового випромінювання поверхонь, вкритих рослинністю, створюється маска зображення і частина зображення із показником NDVI нижчим за опорне класифікується з метою визначення типів поверхонь. Після класифікації кожному типу поверхні присвоюється відповідне значення коефіцієнта теплового випромінювання, які встановлювались інструментально в ході виконання підсупутникових вимірювань температур. Сукупність значень коефіцієнтів теплового випромінювання, яка отримується сумою коефіцієнтів для кожного окремого типу поверхонь комплексується в окреме зображення коефіцієнтів теплового випромінювання далі застосовується для розрахунку температури.

Для отримання зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання застосовувались дані мультиспектрального знімання сенсорами супутників Landsat, які суміщені із даними теплового знімання.

З метою інструментального визначення коефіцієнтів теплового випромінювання по території Києва було створено ряд полігонів з різними типами покриття, на території яких виконувалось вимірювання коефіцієнта теплового випромінювання та температура. Розташування полігонів і тип покриття зображено на рис. 10.7.



Рисунок 10.7. Тестові ділянки пірометричні вимірювань на території Києва. Умовні позначення: 1 – асфальт; 2 – ґрунт; 3 – бруківка; 4 – ґумове покриття; 5 – рослинні покриття; 6 – пісок; 7 – металеві покриття; 8 - водні поверхні.

Підсупутникові наземні вимірювання температур поверхонь на тестових ділянках за допомогою портативного польового пірометра виконуються паралельно із розрахунком температури земної поверхні досліджуваної території за інфрачервоними космічними зображеннями. Пірометр дозволяє визначати як яскравісну температуру дистанційно за допомогою вбудованого мікроболометричного сенсора інфрачервоного випромінювання, так і безпосередньо термодинамічну температуру контактно за допомогою термометричної пари. В такий спосіб можливо отримати значення коефіцієнта теплового випромінювання вимірюваної поверхні.

Пірометри – компактні та ефективні засоби визначення двох найважливіших теплових характеристик поверхонь: температури i коефіцієнта теплового пірометрів випромінювання. При цьому більшість дозволяють визначати цi характеристики як контактним так і дистанційним способом. Перевагами дистанційного способу вимірювання температури є:

1) висока швидкодія, яка визначається типом приймача випромінювання і схемою обробки електричних сигналів;

2) можливість вимірювання температури рухомих об'єктів та елементів обладнання, що знаходяться під високовольтним потенціалом;

3) відсутність спотворення температурного поля об'єкта контролю, що особливо актуально при вимірюванні температури матеріалів з низькою теплопровідністю (дерево, пластик та ін.), А також ризику пошкодження поверхні і форми у разі м'яких (пластичних) об'єктів;

4) можливість вимірювання високих температур, при яких застосування контактних засобів вимірювання або неможливо.

Пірометр являє собою легкий, компактне пристрій, що дозволяє з досить високою точністю визначати температуру поверхонь різного типу двома способами: контактним і безконтактним, що дає можливість з більшою точністю визначати температуру предметів, як з відомим коефіцієнтом теплового випромінювання, та і визначати коефіцієнт теплового випромінювання та істинну температуру поверхні об'єктів невідомого або змішаного складу. При необхідності точного наведення приладу на віддалену поверхню більшість пірометрів мають лазерний цілевказівник.

Пірометри дозволяють визначати інтенсивність випромінювання в тепловому діапазоні і на підставі цього показника розраховувати значення температури досліджуваної поверхні. При цьому для більшості пірометрів можливо вказати коефіцієнт теплового випромінювання поверхні, якщо він відомий, що дозволить значно точніше визначити температуру досліджуваної поверхні.

Основними недоліками пірометричних вимірювань температури є складність повного врахування зв'язків між термодинамічною температурою об'єкта та тепловою радіацією, що реєструється пірометром. Необхідно враховувати зміну випромінювальної здатності поверхні від довжини хвилі у відповідному спектральному діапазоні та від температури в діапазоні вимірювань, наявність поглинання випромінювання в середовищі між пірометром і об'єктом контролю, геометричні параметри поля зору пірометра і його оптичної системи, температуру навколишнього середовища і корпусу приладу.

Так само, при можливості, необхідно дослідним шляхом встановити коефіцієнт теплового випромінювання конкретної поверхні. Для цього проводиться вимірювання температури об'єкта контактним способом (наприклад, поверхневої термопарою, яка дуже входить В комплект поставки пірометра), потім, змінюючи часто значення випромінювальної здатності на датчику пірометра, домогтися рівності показань пірометра і термопари. Якщо з якихось причин провести вимірювання температури об'єкта контактним способом неможливо, цю процедуру слід провести із зразком матеріалу об'єкта, нагріваючи його до температури близької до температури об'єкта. Деякі моделі пірометрів мають можливість підключення термопари і можуть вимірювати температуру контактним і безконтактним способом одночасно.

Тепловізор – пристрій, який дозволяє створювати растрове зображення росподілу температури дослідної поверхні, тобто, на відміну від пірометра, який виконує вимірювання температури лише в одній точці, тепловізор формує матрицю точок із значеннями температур. Тепловізор також дає можливість розрахунку коефіцієнта теплового випромінювання у комбінації із контактним вимірюванням, і найбільш точний результат досягається за умови виконання деяких вимог:

1) потрібно щоб температура поверхні об'єкта контролю відрізнялася від фонової температури на 20°С і більше. Якщо об'єкт слабо відрізняється по температурі від температури фону, похибка вимірювання коефіцієнта випромінювання буде неприйнятною.

2) Провести вимірювання відбитої радіаційної температури і вказати це значення в тепловізорі. Якщо намагатися вимірювати коефіцієнт випромінювання при помилково виставленому значенні фонової температури, результат буде неправильним.

Для підсупутникових завіркових вимірювань сформовано ряд вимог, яких необхідно дотримуватись для підвищення достовірності [240]:
1) вимірювання виконуються в день супутникового знімання в межах 2 годин до і після часу прольоту;

2) вимірюються температури однорідних поверхонь, площа яких покриває більше ніж 10 пікселів супутникового зображення для зниження впливу на результат суміжних пікселів;

3 вимірювання виконуються не менше ніж 5 разів в різних точках досліджуваної поверхні, відстань між якими більше ніж 5 метрів як дистанційним так і контактним способом;

4) під час вимірювань виключається суміщення різних типів покриття та вимірювання затінених площ;

5) паралельно із вимірюванням температур поверхонь також визначаються додаткові дані — погодні умови за допомогою портативної метеостанції, рівень освітленості території (у люксах) за допомогою портативного люксометра.

Обов'язковою умовою виконання вимірювань є мінімальна хмарність або її відсутність, оскільки хмарність негативно впливає не лише на достовірність наземних вимірювань, а і перешкоджає отриманню точних значень спектральної щільності енергетичної яскравості за допомогою супутникових даних.

Розрахунок температури земної поверхні через спектральну щільність енергетичної яскравості виконується через формулу (10.6), адаптовану до конкретної інфрачервоної знімальної апаратури:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_0} + 1\right)},$$
(10.8)

де  $K_1, K_2$  – апаратні константи конкретного сенсора. Для інфрачервоної знімальної апаратури супутникових систем серії Landsat ці константи наведено в таблиці 10.4.

	-			
Супутникова	Landsat TM	Landsat ETM+	Landsat TIRS	Landsat TIRS
система	(band 6)	(band 6)	(band 10)	(band 11)
$K_1$	607,76	666,09	774,89	480,89
<i>K</i> <sub>2</sub>	1260,56	1282,71	1321,08	1201,14

Таблиця 10.4. Апаратні константи супутникових систем серії Landsat

В результаті застосування (2.4), (2.6), (2.7) та (2.8) до супутникового інфрачервоного зображення отримується растр досліджуваної території із значеннями температури земної поверхні та коефіцієнта теплового випромінювання в кожному пікселі. Загальний порядок розрахунків температурного поля земної поверхні за даними космічного знімання супутникової системи Landsat-8 описано діаграмою на рис. 10.8.



Рисунок 10.8. Етапи отримання температурного поля земної поверхні: a – супутникове зображення дальнього інфрачервоного діапазону;  $\delta$  – відкаліброване та атмосферно скориговане інфрачервоне зображення; e – багатоспектральне супутникове зображення видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів; e – просторовий розподіл вегетаційного індексу *NDVI*;  $\partial$  – просторовий розподіл відносного проективного покриття рослинності; e – маска території без рослинності; e – прикінцеве температурне поле земної поверхні

Реалізація розрахунку температур земної поверхні за результатами інфрачервоного космічного знімання включає радіометричне калібрування інфрачервоного зображення, залучення моделі атмосфери до рівнянь радіаційного переносу та оцінку коефіцієнтів теплового випромінювання природних і штучних поверхонь досліджуваної території. Багатоспектральне супутникове зображення залучається для отримання вегетаційного індексу NDVI, на основі якого відокремлюються для подальшої обробки поверхні, вкриті рослинністю та без неї. На основі NDVI розраховується відносне проективне покриття рослинності (2.6), за ним – коефіцієнти теплового випромінювання вегетуючих поверхонь (2.7), а коефіцієнти теплового випромінювання поверхонь без рослинності одержуються зі спектральної бібліотеки, сформованої за даними пірометричних вимірювань. Значення фізичної температури в кожному пікселі зображення відновлюються за оберненою формулою Планка (10.8).

### Результати вимірювань температури та оцінка точності

Результати обробки супутникових зображень Landsat-8 території м. Києва впродовж літнього періоду 2014 та 2016 років завірялися на 16 тестових ділянках з різними штучними та природними поверхнями шляхом проведення підсупутникових наземних термометричних вимірювань. За допомогою польового пірометра визначалися термодінамічна (контактним способом) і радіаційна (дистанційним) температури, за ними розраховувалися відповідні коефіцієнти теплового випромінювання [241].

Результати підсупутникових вимірювань за обидва роки представлено у таблицях 10.5 та 10.6, де Тд°С – значення температури відповідного типу поверхні, визначеного за допомогою пірометра дистанційним способом, Тк°С – контактним способом, ТдL°С – дані температури відповідної поверхні, визначеної за даними сенсора TIRS (супутник Landsat-

8), Тп°С – температура повітря. визначена за допомогою портативної метеостанції, Час – час виконання вимірювання, Волог. – відносна вологість повітря, є – значення коефіцієнта теплового випромінювання, виміряного пірометром. На рис. 10.9 зображений приклад розподілу температурного поля міста Києва за 25 червня 2015 р.



Рисунок 10.9. Температурне поле м. Києва за результатами обробки даних супутникової системи Landsat-8 від 25 червня 2015 р.

Таблиця 10.5. Результати виконання польових вимірювань температури на дослідних ділянках за 2014 р.

Дата	Тип поверхні	Тд°С	Тκ°С	ТдL°С	Тπ°С	Волог, %	Час
08.07.2014	Асфальт	41,3	40,6	38,5	32,1	42%	
	Рослинний покрив	31,8	29,5	35,67	32,9	69%	
	Асфальт	50,0	44,1	42,47	34,9	34%	
	Пісок	43,0	44,5	38,35	34,3	36%	
	Водна поверхня	29,0	28,2	31,11	33,8	36%	
	Розріджений рослинний покрив	37,0	35,1	42,23	34,5	33%	
	Ґрунт	45,0	48,0	45,23	34,5	33%	
15.07.2014	Бруківка	35,5	37,0	34,51	32,7	49%	10:44
	Асфальт	37,0	39,5	35,73	29,3	45%	10:52
	Рослинний покрив	32,7	33	30,44	31,4	47%	11:05
	Бруківка	40,0	38,5	35,47	30,4	45%	12:30
24.07.2014	Асфальт	38,0	36,8	34,14	28,4	44%	10:30
	Гумове покриття	51,0	50,8	49,83	29,6	40%	11:45
	Асфальт	45,9	45,1	45,1	32,5	33%	12:10
	Рослинний покрив	26,7	28,6	29,51	31,9	42%	12:20

					Продовження таблиці 10.5		
31.07.2014	Гумове покриття	57,0	55,0	50,53	33,3	26%	11:06
	Асфальт	47,7	49,5	44,69	34,6	22%	11:38
	Бруківка	48,0	44,0	42,61	33,7	25%	12:00
	Рослинний покрив	30,5	36,5	33,73	33,7	23%	12:32
	Пісок	42,3	52,3	46,1	37,1	22%	12:40
09.08.2014	Асфальт	41,7	41,0		28,0	44%	10:36
	Пісок	40,5	42,5		32,0	46%	11:05
	Водна поверхня	23,1	30,7		26,5	47%	11:15
	Гумове покриття	56,0	51		31,0	42%	11:39
	Асфальт	42,0	43,3		31,0	37%	12:15
16.08.2014	Бруківка	30,5	34,5		29,7	52%	10:15
	Бруківка	27,0	39,6		30,4	52%	10:35
01.09.2014	Гумове покриття	46,5	45,3	40,45	25,1	51%	11:10
	Асфальт	35,6	38,1	36,34	25,7	50%	11:25
	Рослинний покрив	29,9	35,2		27,0	46%	11:50
	Рослинний покрив	36,4	37,3		27,0	46%	12:00
	Рослинний покрив	26,3	37,3		31,1	39%	12:20
	Пісок	39,5	45,3	37,38			12:30
	Водна поверхня	23,3	24,8	23,74			12:35
10.09.2014	Асфальт	36,3	36,9		25,6	46%	10:50
	Гумове покриття	48,9	43,2		25,1	46%	11:50
	Асфальт	39,1	38,7		25,0	48%	12:05
	Пісок	34,2	40,6		28,5	40%	12:47
	Водна поверхня	16,0	26,5		22,5	43%	12:52
17.09.2014	Бруківка	29,5	28,5	26,75	21,5	51%	10:50
	Асфальт	33,0	31,2	32,9	22,0	46%	11:30
	Рослинний покрив	36,5	34,5	35,44	23,5	39%	12:00
	Бруківка	29,5	31,5	28,54	23,6	42%	12:10
	Рослинний покрив	28,9	28,4	29,18	23,0	38%	12:37

Продовження таблиці 10.5

Таблиця 10.6. Результат виконання польових вимірювань температури на дослідних ділянках за 2016 р.

Дата	Тип поверхні	Тд°С	Тк⁰С	ТдL°С	3	Тπ°С	Волог. %	Час
13.07.2016	Асфальт сірий	48,5	45	47,66	0,95	32	38	11:10
	Сталь шорстка	45	38	47,10	0,9	33	38	11:20
	Асфальт сірий	43,7	42	47,10	0,95	33	38	11:30
	Асфальт сірий	51	46	50,04	0,95	33	32	12:11
	Розріджений рослинний	43,7	38,5	41,10	0,95	33	39	12:56

покрив				

						продов	эжеппя таол	иці 10.0
29.07.2016	Бруківка	36,9	36,5	39,39	0,88	27,5	48	9:30
	Асфальт сірий	43,2	40	43,17	0,95	32,2	48	10:12
	Пісок	37,5	41,5	37,24	0,94	31,3	47	10:20
05.08.2016	Бруківка	35,7	37	42,83	0,88	29,9	38	9:40
	Рослинний покрив	35,9	34,8	37,92	0,96	30,8	39	10:10
	Водна поверхня	28,5	27,5	27,47	0,93	30,8	39	10:15
06.09.2016	Гумове покриття	31	33,2	34,62	0,88	25,8	51	10:17
	Бруківка	32,9	34,4	29,02	0,88	26,8	50	10:50
	Асфальт черврний	33,3	36,6		0,93	27,2	50	11:10
	Пісок	32	38,8	35,10	0,94	27,4	50	11:34
15.09.2016	Асфальт сірий	32,4	31,8	33,01	0,95	22	39	10:30
	Сталь шорстка	34,5	34,5	32,70	0,9	21,9	41	11:20
	Асфальт сірий	33	35	32,70	0,95	21	41	10:25
	Гумове покриття	40	37,5	36,07	0,88	24	35	12:20
	Асфальт сірий	29,8	31,8	35,02	0,95	21,8	40	11:44
	Розріджений рослинний покрив	32,3	33,2	31,37	0,95	24,3	37	13:01

Продовження таблиці 10.6

Середня похибка температури, одержаної за результатами обробки інфрачервоних космічних знімків, відносно контактних вимірювань на тестових ділянках склала 3,3°С, при цьому максимальне абсолютне відхилення дорівнює 6,15°С для рослинного покриття. В окремих випадках різниця вимірювань пов'язана із негомогенністю поверхонь таких як асфальт (неоднорідність пов'язана із фракційним складом асфальту, окремі фракції якого мають різні теплові властивості), пісок (піщані поверхні мають складний мікрорельєф тому окремі ділянки піщаних пляжів можуть мати різноманітні температури). Те ж саме стосується і рослинних поверхонь.

Практика підсупутникових вимірювань температур показала, що вимірювання температур поверхонь пов'язана із значним впливом погодних умов, вітром хмарністю. Хмарність часто робить недоцільним виконання польових підсупутникових робіт, космічні зображення будуть заповнені хмарністю. Через хмарність пов'язана нестача придатних до обробки зображень за 2015 р.через що відсутні дані підсупутникових вимірювань. Дрібні хмари можуть періодично закривати Сонце через що нагріті до високих температур поверхні починають охолоджуватись. Вітер також охолоджує досліджувані поверхні знижуючи кореляцію між даними польових вимірювань та супутниковими даними. Але не зважаючи на сторонній вплив на польові термометричні вимірювання, кореляція між даними підсупутникових вимірювань та отриманими результатами обробки космічних зображень залишається достатньо високою.

# Спеціалізоване програмне забезпечення для визначення температури і коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні за матеріалами космічного знімання.

Для отримання растру температур і коефіцієнтів теплового випромінювання розроблено спеціалізоване програмне забезпечення, представлене розрахунковим модулем для програмного продукту обробки та візуалізації даних дистанційного зондування Exelis ENVI.

Програмний модуль Temperature\_GUI призначений для визначення температури земної поверхні за супутниковими зображеннями супутникової системи Landsat-8. Модуль розроблено у програмному середовищі IDL та інтегровано до програмного пакету ENVI.

В основі роботи програмного модулю Temperature\_GUI є визначення температури земної поверхні за вищевикладеними моделями. Для роботи модулю необхідне залучення додаткових даних про коефіцієнти теплового випромінювання різних типів земної поверхні, кутів проведення зйомки, величин спектральної щільності енергетичної яскравості спадного та висхідного випромінювання в атмосфері.

Структурно програмний модуль Temperature GUI складається з блоків вибору зображення для оброблення та зчитування вхідних даних, обчислення спектрального випромінювання, обчислення коефіцієнту теплового атмосферно-скоригованої спектральної шільності енергетичної яскравості, обчислення термодинамічної температури земної поверхні. Кожен із зазначених блоків реалізує окремий етап алгоритму розрахунку температури. Основні елементи графічного інтерфейсу модуля показано на рис. 10.10.



Рисунок 10.10. Елементи інтерфейсу програмного модуля Temperature\_GUI: a – робоче вікно з вибором вхідних параметрів;  $\delta$  – вікно введення параметрів атмосфери та робочої області; в – вікно обчислення частки проективного покриття рослинності; c – вікно введення параметрів розрахунку індексу NDVI;  $\partial$  – вікно розрахунку атмосферноскоригованих значень спектральної щільності енергетичної яскравості

## Підвищення просторової розрізненності зображень теплових полів.

Застосування описаного вище способу отримання зображення просторового розподілу на основі даних мультиспектрального знімання супутниками Landsat які мають просторову розрізненність 30 м дозволяють значно підвищити детальність кінцевих зображень температурного поля, яке будується на основі даних теплового знімання із просторовою розрізненністю 120 м (сенсор TM, Landsat-4, 5), 60 м (сенсор ETM+, супутник Landsat-7) та 100 м (сенсор TIRS, супутник Landsat-8).

Додаткового підвищення просторової розрізненності можливо досягти за допомогою програмного методу. Підвищення просторової розрізненності можливе при наявності двох або більше зображень із інваріантними даними для однієї території і виконується при накладанні одного зображення на інше на частку піксела. В даному випадку застосовуються два різночасових зображення коефіцієнтів теплового випромінювання.

Першим етапом підвищення просторової розрізненності є оцінка субпіксельного зміщення зображень одне відносно іншого, за допомогою опорних текстур із чіткими контурами та високим контрастом відносно інших частин зображення. Із вихідних зображень виділяються невеликі ділянки однієї території розбиваються на рівну кількість субпікселів та розраховується кількість субпікселів зміщення та його напрямку на основі аналізу частотних спектрів цих зображень, в результаті якої отримуються значення та напрям зміщення по горизонтальній та вертикальній осях.

Другий етап – відновлення зображень підвищеної розрізненності у субпікселах  $x_{ij}$  *i* = 1 ... nx+p-1, *j* = 1 ... ny+q-1 по відомих значеннях зображення  $y_{ij}$  в пікселах вхідного набору зображень низької розрізненності, зміщених на 1/p та 1/q частки піксела вздовж осей *x* та *y* відповідно. Значення пікселів виражаються через субпіксельні зміщення системою рівнянь:

$$y_{ij} = \sum_{k=l}^{i+p-1} \sum_{l=1}^{j+q-1} x_{kl}, \quad i = 1..n_x, \quad j = 1..n_y, \quad (10.9)$$

яка складається з  $n_x \times n_y$  рівнянь з  $(n_x+p-1) \times (n_y+q-1)$  невідомими. Строгий розв'язок системи (7) знаходиться за рекурентною формулою:

$$x_{ij} = y_{(i-p+1)(j-q+1)} - \sum_{k=i-p+1}^{i-1} \sum_{j-q+1}^{j-1} x_{kl} - \sum_{k=i-p+1}^{i-1} x_{kj} - \sum_{l=j-q+1}^{j-1} x_{il} , \qquad (10.10)$$

$$i = p ..n_x + p - 1 ,$$

$$j = q ..n_y + q - 1 .$$

Для уникнення накопичення шумів, застосовується розв'язок у прямокутному плаваючому вікні розмірністю  $w \times u$  пікселів низької розрізненності для оцінювання піксела підвищеної розрізненності  $x_{ij}$ . Припускаючи, що w+p-1 та u+q-1 є непарними числами, розв'язок  $x_{ij}$  з мінімальною вибірковою дисперсією при  $(w+p-1)\times(u+q-1)$  невідомих може бути знайдено із системи рівнянь:

$$y_{ij} = \sum_{k=i}^{i+p-1} \sum_{l=j}^{j+q-1} x_{kl}, \ k = i - \frac{(w+p)}{2} - 1..i + \frac{(w-p)}{2}, \ l = j - \frac{u+q}{2} - 1..j + \frac{u-q}{2}.$$
(10.11)

Модель відновлення зображення підвищеної просторової розрізненності виражаються наступним чином:

$$X = R \times Y + \phi, \qquad (10.12)$$

де X – зображення підвищеної розрізненності, розгорнуте у вектор, Y – ряд зображень низької розрізненності, розгорнутих у вектори, R – матриця оператора пересемплювання,  $\phi$  – вектор похибок [242].

Оцінка підвищення якості виконується на основі розрахунку функції передачі модуляції вихідних зображень та результуючого зображення, яка продемонструвала, що підвищення просторової розрізненності складає 46 %. Візуалізація різниці між вихідними зображеннями та кінцевим представлена на рис. 10.11 на прикладі різночасових зображень коефіцієнтів теплового випромінювання за 28 липня 2015 р. та 13 серпня 2015 р.



Рисунок 10.11. Порівняння елементів вихідних зображень коефіцієнтів теплового випромінювання із кінцевим після підвищення просторової розрізненності

Сучасна висока динаміка розвитку та розширення урбанізованих територій потребує наявності широкого інструментарію оперативного моніторингу змін, які є невід'ємним наслідком урбанізації. Практика показує, що практично вся антропогенна діяльність пов'язана із видозміною ландшафтів та заміщенням територій із низькою тепловою інерцією та здатністю до теплопоглинання об'єктами та поверхнями із високою здатністю до поглинання тепла. Космічний моніторинг у тепловому діапазоні дозволяє детально окреслювати теплове поле урбанізованого середовища. Не дивлячись на те, що фізичні фактори обмежують можливість створення космічних систем теплового знімання порівняно високої просторової розрізненності, сучасні програмні підходи дозволяють виконувати детальне картування теплового поля із застосуванням вхідних даних теплового діапазону із просторовою розрізненністю 60 м і більше.

Розмаїття об'єктів та поверхонь, характерних для урбанізованого середовища потребує детального вивчення їх теплових властивостей, зокрема, коефіцієнта теплового випромінювання. Таким чином необхідне подальше накопичення даних підсупутникових вимірювань температури та коефіцієнта теплового випромінювання а також визначення цих значень в лабораторних умовах при різних температурах а також вимірювання температур різних характерних поверхонь під відкритим сонячним світлом на спеціально створеному полігоні за короткий проміжок часу за умови зниженого впливу погоди (наприклад, захищена від вітру ділянка), оскільки постійні коливання атмосферних умов, вітер, хмарність значним чином пливають на якість польових вимірювань а необхідність подолання значних відстаней між полігонами потребує значних часових ресурсів.

Сенсор TIRS супутника Landsat-8 надає дані теплового знімання у двох спектральних діапазонах. Розрахунок температур поверхонь із застосуванням адаптованого модуля відокремленого розрахунку температури та коефіцієнта теплового випромінювання за багатоканальними даними сенсора ASTER (TES) потенційно дозволяє значно підвищити точність моделі розрахунку температур [216].

Точність моделі визначення температури за даними космічного знімання також залежить від параметрів атмосфери та коригування значень висхідної та низхідної спектральних щільностей енергетичної яскравості та пропускної здатності атмосфери у заданих діапазонах. Подальше дослідження розподілу атмосферних параметрів, що впливають на модель радіаційного переносу, в залежності від широти, кліматичних умов, вологості та інших, вимірювання параметрів радіаційного переносу [235] також дозволять значно підвищити точність моделі розрахунку температур.

Дані супутників Landsat у тепловому діапазоні надаються починаючи з 1982 року. Таким чином, наразі існує база теплових знімків більш ніж за три десятиліття, які можуть стати основою для побудови часових рядів динаміки температурного поля. Разом із тепловими даними також надаються дані мультиспектрального знімання, що надають можливість достатньо точно класифікувати поверхні досліджуваних територій, що в сукупності дає можливість з високою точністю прослідковувати розвиток антропогенної та техногенної діяльності, включаючи вирубки лісів, динаміку забудови територій та ін., виявляти різницю теплових полів що відбулись за конкретні часові періоди.

Отже, суміщення на одній платформі систем знімання видимого, ближнього інфрачервоного та багатоканального теплового знімання дуже ефективно себе зарекомендувало у вирішенні широкого спектру задач, і в майбутньому доцільне створення широкого ряду систем такого роду, оскільки на разі наявний їх брак особливо в сучасних умовах інтенсивного розвитку урбанізованих територій.

#### ВИСНОВКИ

За час виконання проекту в рамках «Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012-2016 рр.» створено потужну теоретичну основу для підвищення достовірності визначення ряду біофізичних параметрів типових фітоценозів основних ландшафтно-кліматичних зон України на основі комплексного оброблення багатоспектральних супутникових зображень та даних завіркових наземних вимірювань: обґрунтовано вибір основних біофізичних параметрів рослинних угруповань, які можуть бути визначені дистанційно, розроблено відповідні методи, алгоритми та математичні моделі оцінювання обраних біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів, зібрано та систематизовано значний обсяг наземних завіркових даних за тематикою досліджень. Ключовими науково-практичними результатми даного проекту є:

1. Проаналізовано сучасний стан актуальної проблемі оцінювання та прогнозування стану лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів. Проведено аналіз стану досліджень та обґрунтування методів оцінювання біофізичних параметрів рослинних угруповань на основі оброблення даних дистанційних вимірювань та спостережень. Визначено біофізичні параметри лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів, що можуть ефективно вимірюватися за даними багатоспектральної супутникової зйомки, висота деревостанів, ярусність, частка вегетаційного покриву (fVC), 3D структура лісу, індекс листкової поверхні (Leaf Area Index), частка поглиненої фотосинтетично активної радіації (fPAR), чиста первинна продуктивність (NPP), евапотранспірація, вологість, тощо.

2.

Обгр

унтовано сукупність біофізичних параметрів рослинних угруповань, які можуть бути визначені дистанційно, та проведено дослідження особливостей їхніх змін в межах різних типів рослинного покриву в різних ландшафтно-кліматичних зонах України на прикладах вибраних тестових ділянок.

3. Розроблено метод оцінювання LAI на основі багатоспектральних космічних знімків середньої просторової розрізненності та польових вимірювань. Визначено регресійні залежності LAI від NDVI на основі багатоспектральних космічних знімків середньої просторової розрізненності Landsat TM, RapidEye, «Січ-2», які задовольняють умовам дослідження (фенологічні фази з максимальною продуктивністю, допустимий відсоток покриття знімку хмарами та ін.).

4. Розроблено метод оцінювання індексу листкової поверхні (LAI) та біомаси на основі даних LiDAR та польових вимірювань. Розроблено схему методу оцінювання індексу листкової поверхні (LAI), яка базується на побудові регресійної моделі зв'язку між значеннями індексу LAI і деривативами (похідними продуктами) від даних авіаційної лідарної зйомки.

 Розроблено метод оцінки валової первинної продуктивності (GPP) та чистої первинної продуктивності (NPP) рослинного покриву агроценозу для основних сільськогосподарських культур за даними космічної зйомки MODIS.

6. Розроблено метод оцінки зволоження земних покривів за даними космічної зйомки MODIS.

7.

Розр

облено алгоритми визначення температури та спектральних коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні за матеріалами інфрачервоного знімання.

8.

Пров

едено валідацію методу оцінювання індексу листкової поверхні (LAI) на основі багатоспектральних космічних знімків середньої просторової розрізненності. Наземні вимірювання LAI проводилися на шести тестових ділянках із залученням способу обчислень за напівсферичними фотографіями картини розподілу світла під пологом дерев. Результати проведеної валідації свідчать про належну точність оцінювання LAI розробленим методом. Середня похибка значень LAI, одержаних за супутниковими зображеннями Landsat-8 OLI, відносно польових вимірювань на тестових ділянках склала 22,3%.

9. Проведено валідацію методу оцінки зволоження земного покриву, де у якості індикатора, що характеризує стан зволоження земного покриття та водообмін у верхньому шарі ґрунту, запропоновано використання водного індексу NWI. При цьому використовувались супутникові дані Sentinel-2. Отримано кореляційні залежності між значеннями вологості у ґрунті та індексом NWI на рівні г<sup>2</sup>=0.8. Це дозволяє проводити оцінку розподілу зволоженості відкритого ґрунтового покриву за даними Sentinel-2 за умови калібрування залежностей, використовуючи наземні завіркові дані.

Проведено валідацію алгоритму визначення температури земних поверхонь та коефіцієнтів теплового випромінювання. Результати вимірювань температури за супутниковими зображеннями Landsat-8 OLI території м. Києва впродовж літнього періоду 2014 та 2016 років завірялися на 16 тестових ділянках з різними штучними та природними поверхнями шляхом проведення підсупутникових наземних термометричних вимірювань. Середня похибка температури, одержаної за результатами обробки інфрачервоних космічних знімків, відносно контактних вимірювань на тестових ділянках склала 3,3°C, при цьому максимальне абсолютне відхилення дорівнює 6,15°C для рослинного покриття. В окремих випадках різниця вимірювань пов'язана із фракційним складом асфальту, окремі фракції якого мають різні теплові властивості), пісок (піщані

поверхні мають складний мікрорельєф тому окремі ділянки піщаних пляжів можуть мати різноманітні температури).

# ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- Бунь Р.А. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України / Р.А. Бунь, М.І. Густа, В.С. Дачук, Л.І. Кужій, Б.Я. Олексів, Г.В. Стрямець, С.П. Стрямець, О.Є. Токар, Я.Б. Цибрівський. За ред. Р.А. Буня // Львів: Українська академія друкарства, 2004. – 376 с.
- Балабух В.О. Зміна екстремальних погодних умов в Україні та їх прогноз до середини XXI століття. [Електронний ресурс]. Електронний доступ: http://www.slideshare.net/infoclimateorg/vbalabukh-extreme-weatherforecasts?ref=http://climategroup.org.ua/?p=2019 - Зміна екстремальних погодних умов в Україні
- 3. Букша И.Ф. Изменение климата и лесное хозяйство Украины / И.Ф. Букша // Львів: РВВ НЛТУ України. – 2009. – Вип. 7. – С. 11 – 17.
- Shvidenko A. Non-boreal Forests of Eastern Europe in a Changing World: the Role in the Earth Systems // Regional Aspects of Interactions in Non-boreal Eastern Europe. – Springer Science +Business Media B.V. 2009. – P. 123-133.
- Kaletnik M.M. Environmental factors and State of Ukrainian forests: Monitoring and Impact Assessment / M.M. Kaletnik I.F., Buksha, O.M. Radchenko, O.S. Sidorov // Restoration of forests: environmental challenges in Central and Eastern Europe. Proc. NATO adv. res. Wshop in Saulberg, Ger., July 1996) (NATO 2/30) Netherlands: Kluwer Academic Publishers. – 1997. – 151-178 pp.
- Lucas K.L., Carter G.A. The use of hyperspectral remote sensing to assess vascular plant species richness on Horn Island, Mississippi // Remote Sensing of Environment, 2008. – Vol. 112. – Issue 10. – P. 3908-3915.
- Станкевич С.А., Козлова А.О. Особливості розрахунку індексу видового різноманіття Шеннона за результатами статистичної класифікації аерокосмічних знімків // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. – 2006. – Т. 19 (58). – С. 144-150.
- Кочубей С.Н. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики / С.Н. Кочубей, Н.И. Кобец, Т.М. Шадчина. - К.: Наук. думка, 1990. – 136 с.
- Hamada Y., Stow D.A., Roberts D.A. Estimating life-form cover fractions in California sage scrub communities using multispectral remote sensing // Remote Sensing of Environment, 2011. – Vol. 115. – P. 3056–3068.
- Yang G., Pu R., Zhang J., Zhao C., Feng H., Wanga J. Remote sensing of seasonal variability of fractional vegetation cover and its object-based spatial pattern analysis over mountain areas // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, Vol. 77. P. 79–93.
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Acker S.A., Parker G.G., Spies T.A., Harding D. Lidar remote sensing of biophysical properties of canopy structure of forests of Douglas-fir and western hemlock // Remote Sensing of Environment, 1999. – Vol.70. – P. 339-361.

- Korhonen L., Korpela I., Heiskanen J., Maltamo M.Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index // Remote Sensing of Environment, 2011. – Vol. 115. – P. 1065–1080.
- Zhao K.G., Popescu S.C., X. Meng, M. Agca Characterizing forest canopy structure with composite lidar metrics and machine learning // Remote Sensing of Environment, 2011. – Vol. 115(8). – P. 1978-1996.
- 14. Zheng G., Moskal L.M. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors // Sensors, 2009. Vol. 9. P. 2719-2745.
- Ku N.W., Popescu S.C., Ansley R.J., Perotto-Baldivieso H.L. Assessment of Available Rangeland Woody Plant Biomass with a Terrestrial Lidar System // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2012. – Vol. 78(4). – P. 349-364.
- Zhao K., Popescu S.C., Nelson R.F. Lidar remote sensing of forest biomass: A scaleinvariant estimation approach using airborne lasers // Remote Sensing of Environment, 2009. – Vol. 113(1). – P. 182-196.
- Næsset E., Gobakken T. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser // Remote Sensing of Environment, 2008. – Vol. 112. – P. 3079–3090.
- Prieto-Blanco A., North P.R.J., Barnsley M.J., Fox N. Satellite-driven modelling of Net Primary Productivity (NPP): Theoretical analysis // Remote Sensing of Environment, 2009. – Vol. 113. –P. 137–147.
- Goetz S.J., Prince S.D., Goward S.N., Thawley M.M., Small J. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach // Ecological Modelling, 1999. – Vol. 122. – P. 239–255.
- 20. Goetz S.J., Prince S.D. Remote sensing of net primary production in boreal forest stands // Agric. For. Meteorol., 1996. Vol. 78 (3). P. 149–179.
- Hilker T., Coops N.C., Wulder M.A., Black T.A., Guy R.D. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements // Science of the Total Environment, 2008. – Vol. 404. –P. 411– 423.
- 22. Chen J.M. Canopy Architecture and Remote Sensing of the Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Boreal Conifer Forests // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996. Vol. 34. P. 1353-1368.
- García M., Sandholt I., Ceccato P., Ridler M., Mougin E., Kergoat L., Morillas L., Timouk F., Fensholt R., Domingo F. Actual evapotranspiration in drylands derived from in-situ and satellite data: Assessing biophysical constraints // Remote Sensing of Environment, 2013. Vol. 131. P. 103–118.
- Nouri H., Beecham S., Kazemi F., Hassanli A.M., Anderson S.Remote sensing techniques for predicting evapotranspiration from mixed vegetated surfaces // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 2013. – Vol. 10. – P. 3897–3925.
- Cleugh, H.A., Leuning, R., Mu, Q.Z., Running, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment, 2007. – Vol. 106. – P. 285–304.
- Tsouni A., Kontoes C., Koutsoyiannis D., Elias P., Mamassis N. Estimation of Actual Evapotranspiration by Remote Sensing: Application in Thessaly Plain, Greece // Sensors, 2008. – Vol. 8. – P. 3586-3600; DOI: 10.3390/s8063586

- Clevers J.G P.W., L. Kooistra, M. E. Schaepman. Using spectral information from the NIR water absorption features for the retrieval of canopy water content // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 2008. Vol. 10. P. 388–97.
- 28. Cleversa J.G.P.W., Kooistra L., Schaepman M.E. Estimating canopy water content using hyperspectral remote sensing data // Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010. Vol. 12. P. 119–125.
- Penuelas J., Pinol J., Ogaya R., Filella I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970) // Int. Journal of Remote Sensing, 1997. Vol. 18 (13). P. 2869–2875.
- Reed B., Budde M., Spencer P., Miller A.E. Integration of MODIS-derived metrics to assess interannual variability in snowpack, lake ice, and NDVI in southwest Alaska // Remote Sensing of Environment, 2009. – Vol. 113(7). – P. 1443–1452.
- 31. Linderholm H.W. Growing season changes in the last century Agricultural and Forest // Meteorology, 2006. Vol. 137. P. 1–14.
- Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N Nondestructive estimation of anthocyanins and chlorophylls in anthocyanic leaves // Am. J. Bot., 2009. – Vol. 96(10). – P. 1861–1868.
- Blackburn G.A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches // Remote Sensing of Environment, 1998. Vol. 66. P. 273–285.
- 34. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sensing of Environment, 2002. Vol. 81. P. 337–354.
- 35. Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // J. Plant Physiol., 2003. Vol. 160. P. 271–282.
- Blackburn G.A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments // J. Exp. Bot., 2007. Vol. 58(4). – P. 855–867.
- 37. Багатоспектральні методи ДЗЗ в задачах природокористування [Текст] / За ред. В.І. Лялька і М.О. Попова. К.: Наук. думка, 2006.
- 38. Попов М.О. Оцінювання характеристик зелених насаджень з використанням засобів дистанційного зондування Землі / М.О. Попов, І.Д. Семко // Зб. наукових праць "Екологічна безпека та природокористування". - К.: КНУБА, 2012. Вип. 12. С. 51-62.
- 39. Данилин И.М. Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири [Текст]: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02 / Данилина Игоря Михайловича; Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – Красноярск, 2003. – 35 с.
- Данилин И.М. Оценка структуры и состояния лесного покрова на основе лазерного сканирования и цифровой аэро- и космической съемки [Текст] / И.М. Данилин, Е.М. Медведев // География и природные ресурсы, 2005. – Вып. 3. – С. 109-113.
- 41. Лакида П.І. Фітомаса лісів України [Текст] / П.І. Лакида // Національний аграрний університет України Тернопіль, 2001 256 с.
- 42. Gougeon F. A. Forest regeneration: individualtree crown detection techniques for density and stocking assessments [Text] / F.A. Gougeon, D.G. Leckie // International Forum on

Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry – Canada, 1998. – P. 169-177.

- 43. Hayward C. Estimating the significant above ground biomass of Amazonian rain forest using low altitude aerial videography [Text] / C. Hayward, D. Slaymaker // American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, May 16 – 18, 2001.
- 44. Pouliot D.A. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration [Text] / D.A. Pouliot, D.G. King, D.J. Pitt, F.W. Bel // Remote Sensing of Environment, 2002. № 82. P. 322-334.
- 45. Measures R.M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications [Text] / R.M. Measures // Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1992 510 p.
- Hyyppä J. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner [Text] / J. Hyyppä, M.Inkinen // The Photogrammetric Journal of Finland, 1999. – Vol. 16. – No. 2. – P. 27-42.
- Morsdorf F. Clustering in Airborne Laser Scanning Raw Data for Segmentation of Single Trees [Text] / F. Morsdorf, E. Meier, B. Allgöwer, D. Nüesch // Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2003. – Vol. 34. – No. 3. – P. 330-336.
- Reitberger J. Combined tree segmentation and stem detection using full waveform LiDAR data [Text] / J. Reitberger, P. Krzysteck, U. Stilla // Remote Sensing and Spatial Information, 2007.– Vol. 36. No. 3. P. 332-337.
- 49. Wang Y. A Lidar point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modelling in forest [Text] / Y. Wang, H. Weinacker, B. Koch // Sensors, 2008 Vol. 8. No. 6. P. 3938-3951.
- Gupta S. Comparative Analysis of Clustering-Based Approaches for 3-D Single Tree Detection Using Airborne Fullwave Lidar Data [Text] / S. Gupta, H. Weinacker, B. Koch // Remote Sensing, 2010. – 2. – P. 968-989.
- 51. Wang Y. Lidar point cloud based fully automatic 3d single tree modelling in forest and evaluations of the procedure [Text] / Y. Wang, H. Weinacker, B. Koch, S. Krzysztof // International Archives of the Photogrammetry, 2008. – 37. – P. 45-52.
- 52. Ene L. Single tree detection in heterogeneous boreal forests using airborne laser scanning and area based stem number estimates [Text] / L. Ene, E. Næsset, T. Gobakken // Int. Journal of Remote Sensing, 2010. – Vol. 33, No. 16. – P. 5171-5193.
- 53. Solberg S. Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogeneous spruce forest [Text] / S. Solberg, E. Næsset, O. Bollandsas // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006. – vol. 72. – P. 1369–1378.
- Holmgren J. Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesting machinery [Text] / J. Holmgren, A. Barth, H. Larsson, H. Olsson // 10th International Conference on LIDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, September 2010, Freiburg, Germany // Silva Fennica, 2010. – 46(2). – P. 227-239.
- 55. Pitkänen J. Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maximal methods [Text] / J. Pitkänen // Canadian Journal of Forest Research, 2001. Vol. 31. P. 832-844.
- 56. Pitkänen J. Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model [Text] / J. Pitkänen, M. Maltamo, J. Hyyppä, X. Wei Yu // International

Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Freiburg, Germany, 2004. – Vol. 36. – P. 187-191.

- 57. Данилин И.М. Лазерное профилирование лесного полога / И.М. Данилин, Т. Сведз // Лесоведение, 2001, 6, с. 64-69.
- 58. Медведев Е.М. Лазерная локация земли и леса / Е.М. Медведев, И.М. Данилин, С.Р. Мельников // Учебное пособие. Изд. 2-е. М: Красноярск, 2007, 229 с.
- Hyyppä J. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests / J. Hyyppä, H. Hyyppä, D. Leckie, F. Gougeon, X. Yu, M. Maltamo // Int. Journal of Remote Sensing, 2008, 29, pp. 1339–1366.
- Zimblea D. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR / D. Zimblea, D. Evansb, G. Carlsonc, R. Parkerb, S. Gradob, P. Gerardd // Remote Sensing of Environment, 2003, 87, pp. 171 – 182.
- Zaremba M. B. Automated airborne lidar-based assessmentof timber measurements for forest management / M. B. Zaremba, F. Doyon, J.F. Senecal // Management and Production Engineering Review, 2012, 3, pp. 79–85.
- 62. Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications, 2nd Ed. / Berlin: SpringerVerlag, 2004. 382 p.
- Данилин И.М. Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири [Текст]: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02 / Данилина Игоря Михайловича; Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – Красноярск, 2003. – 35 с.
- 64. Daolin Z. Estimating above ground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin/ Z. Daolin, J. Rademacher, J. Chen // Remote Sensing &. Engineering, 2004, 93, pp. 402-411.
- 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, pp. 187-207.
- 66. Morsdorf F. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction / F. Morsdorf, B. Kötz, E. Meier, K. Itten, B. Allgöwer // Remote Sensing of Environment, 2006. Vol. 104, pp. 50-61.
- 67. Zhao K. Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA / K. Zhao, S. Popescu // Remote Sensing of Environment, 2009. Vol. 113, pp. 1628-1645.
- 68. 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, 11, pp. 41-76.
- Lakida P. Estimation of Forest Phitomass for Selected Countries of the Former European USSR / P. Lakida, S. Nilsson, A. Shvidenko // WP-95-79. – Laxenburg, Austria: IIASA, 1995. – 33 p.
- Chen J.M. Defining leaf area index for non-flat leaves / J.M. Chen, T.A. Black // Plant, Cell & Environment, 1992. 15 (4), pp. 421-429.
- 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, pp. 29,429 - 29,443.

- 72. 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.: матеріали доповідей. К.: Наук. думка, 2008. С. 70-75.
- 73. 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, pp. 2403-2417; doi: 10.1093/jxb/erg263.
- 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. 121, pp. 19-35.
- Myneni R.B. The Interpretation of Spectral Vegetation Indexes / R.B. Myneni, F.G. Hall, P.J. Sellers, A.L. Marshak // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, Vol. 33, No. 2, pp. 481-486.
- 76. 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, pp. 52-68.
- 77. 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. 38 (1), pp. 3–14.
- Huete A. MODIS VEGETATION INDEX (MOD13). Algorithm theoretical basis document / A. Huete, C. Justice, W. van Leeuwen // NASA, MODIS-WEB. Version 3, 1999; http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\_mod13.pdf
- 79. 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, pp. 200-216.
- 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 3, 3/2004, pp. 405-413.
- 81. 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, pp. 635-646.
- 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; doi:10.1029/2007JG000635.
- 83. LAI-2000 plant canopy analyzer: operating manual // LI-COR Inc., Nebraska, USA. 1990.
- Zheng G. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors / G. Zheng, L.M. Moskal // Sensors, 2009, 9, pp. 2719-2745; doi:10.3390/s90402719
- 85. Мусієнко М.М., Серебряков В.В., Брайон О.В. Екологія. Тлумачний словник К.: Либідь, 2004. 376 с.
- 86. Gobron N. et al. Uncertainty estimates for the FAPAR operational products derived from MERIS Impact of TOA radiance uncertainties and validation with field data // Remote

Sensing of Environment. – 2008. – Vol. 112. – P. 1871–1883. doi:10.1016/j.rse.2007.09.011.

- 87. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // Remote Sensing of Environment. 1991. Vol. 35. P. 161-173.
- Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T., Hatfield J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat // Agronomy Journal. 1984. 76. P. 300–306.
- Hatfield J.L., Asrar G., Kanemasu E.T. Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance // Remote Sensing of Environment. – 1984. – 14. – P. 65– 75.
- Hall F.G., Huemmrich K.F., Goetz S.J. [et al.]. Satellite remote sensing of surface energy balance, failures, and unresolved issues in FIFE // Journal of Geophysical Research. – 1992. – 97. – P. 19061–19089.
- 91. Sellers P.J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration // Int. Journal of Remote Sensing. 1985. 6. P. 1335–1372.
- 92. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // Remote Sensing of Environment. 1991. 35. P. 161–173.
- Myneni R.B., Asrar G. Tanré D., Choudhury B.J. Remote sensing of solar radiation absorbed and reflected by vegetated land surfaces // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1992. – 30. – P. 302–314.
- 94. Myneni R.B., Williams D.L. On the relationship between FAPAR and NDVI // Remote Sensing of Environment. 1994. 49. P. 200–211.
- 95. Myneni R.B., Nemani R.R., Running S.W. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997. 35. P. 1380–1393.
- Myneni R.B., Maggion S., Iaquinta J. [et al.] Optical remote sensing of vegetation: modeling, caveats, and algorithms // Remote Sensing of Environment. – 1995. – 51. – P. 169–188.
- 97. Hipps L.E., Asrar G., Kanemasu E.T. Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat // Agricultural Meteorology. 1983. 28. P. 253–259.
- Gallo K.P., Daughtry C.S.T., Baur M.E. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies // Remote Sensing of Environment. – 1985. – 17. – P. 221–232.
- 99. Wiegand C.L., Richardson A.J. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: II. Results // Agronomy Journal. 1990. 82. P. 630–636.
- Weiser R.L., Asrar G., Miller G.P., Kanemasu E.T. Assessing grassland characteristics from spectral measurements // Remote Sensing of Environment. – 1986. – 20. – P. 141– 152.
- Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J.M. Direct and indirect estimate of leaf area index fapar and net primary production of terrestrial ecosystems. // Remote Sensing of Environment. – 1999. – 70 (1). – P. 29–51.
- Frouin R., Pinker R. T. Estimating photosynthetically active radiation (PAR) at the Earth's surface from satellite observations. // Remote Sensing of Environment. 1995. 51. P. 98–107.

- 103. Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г., Нильсон С. Материалы к познанию современной продуктивности лесных экосистем России. // Базовые проблемы перехода к устойчивому управлению лесами России. Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – С. 7–37.
- 104. Chapin F.S. et al. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. Ecosystems (N.Y.), 2006, 9, pp. 1041–1050, doi:10.1007/s10021-005-0105-7.
- 105. Schaefer K., C.R. Schwalm, C. Williams et al. A model-data comparison of gross primary productivity: Results from the North American Carbon Program site synthesis. // Journal of Geophysical Research. – 2012. – Vol. 117. – G03010. doi:10.1029/2012jg001960, 2012
- 106. Monteith J.L. Solar radiation and production in tropical ecosystems. // J. Appl. Ecol. 1972. – 9. – P. 747–766. doi:10.2307/2401901.
- 107. Field C.B. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. // Remote Sens. Environ. – 1995. – 51. – P. 74–88. doi:10.1016/0034-4257(94)00066-V.
- Prince S.D., Goward S.N. Global primary production: A remote sensing approach. // J. Biogeogr. – 1995. – 22. – P. 815–835. doi:10.2307/2845983.
- 109. Landsberg J., Waring R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance, and partitioning. // For. Ecol. Manage. 1997. 95. P. 209–228. doi:10.1016/S0378-1127(97)00026-1.
- 110. Running S.W., Thornton P.E., Nemani R., Glassy J.M. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth observing system: in Methods in Ecosystem Science/ Ed. by O.E. Sala et al. – N.Y.: Springer, 2000. – P. 44–57.
- 111. Sims D.A., Luo H., Hastings S., Oechel W.C., Rahman A.F., Gamon J.A. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO2 exchange in response to drought in a southern California chaparral ecosystem // Remote Sens. Environ. – 2006. – 103. – P. 289–303. doi:10.1016/j.rse.2005.01.020.
- Zhao T., Brown D.G., Bergen K.M. Increasing gross primary production (GPP) in the urbanizing landscapes of southeastern Michigan // Photogramm. Eng. Remote Sens. – 2007. – 73(10). –P. 1159–1167.
- 113. Sjöström M., Ardö J., Eklundh L., El-Tahir B.A., El-Khidir H.A.M., Hellström M., Pilesjö P., Seaquist J. Evaluation of satellitebased indices for gross primary production estimates in a sparse savanna in the Sudan. // Biogeosciences. 2009. 6. P. 129–138. doi:10.5194/bg-6-129-2009.
- 114. Turner D.P., Ritts W.D., Cohen W.B. et al. Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring // Global Change Biology. – 2005. –Vol. 11. – P. 666-684
- 115. Waring R.H., Landsberg J.J., Williams M. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? // Tree Physiology. 1998. 18. P. 129-134.
- 116. Landsberg J.J. and R.H. Waring. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning // For. Ecol. Manag. – 1997. – 95. – P. 209-228.
- 117. Cramer W., Kicklighter D. W., Bondeau A., Moore Iii B., Churkina G., Nemry B., Ruimy A., Schloss A. L. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results // Global Change Biology. 1999. Vol. 5(S1). P. 1–15.

- 118. Potter S., Randerson T., Field B., Matson A., Vitousek M., Mooney A., Klooster A. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. // Global Biogeochemical Cycles. 1993. – Vol. 7(4). – P. 811–841.
- Prince S. D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. // Int. Journal of Remote Sensing. – 1991. – Vol. 12.(6). – P. 1313-1330.
- 120. Knorr W., Heimann M. Impact of drought stress and other factors on seasonal land biosphere CO<sub>2</sub> exchange studied through an atmospheric tracer transport model // Tellus. – 1995. – Vol. 47(4). – P. 471–489.
- Ruimy A., Dedieu G., Saugier B. TURC: A diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity // Global Biogeochemical Cycles. – 1996. – Vol. 10(2). – P. 269–285.
- 122. Sellers P.J., Randall D.A., Collatz G.J., Berry J.A., Field C.B., Dazlich D.A., Zhang C., Collelo G.D., Bounoua L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part I: Model formulation // J. Climate. – 1996. – 9. – P. 676–705.
- 123. Esser, G., Hoffstadt J., Mack F., Wittenberg U. High-Resolution Biosphere Model (HRBM) —Documentation Model Version 3.0. Inst. fur Pflanzenokolgie der Justus-Liebig-Univ. Giessen, Giessen, Germany, 1994.
- 124. Parton W.J., Scurlock J.M., Ojima D.S., Gilmanov T.G., Scholes R.J., Schimel D.S., Kirchner T., Menaut J-C., Seastedt T., Garcia Moya E., Kamnalrut A., Kinyamario J.I. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide // Global Biogeochemical Cycles. – 1993. – Vol. 7(4). – P. 785–809.
- McGuire A.D., Melillo J.M., Kicklighter D.W., Joyce L.A. Equilibrium Responses of Soil Carbon to Climate Change: Empirical and Process-Based Estimates // Journal of Biogeography. – 1995. – Vol. 22 (4/5). – P. 785-796.
- Warnant P., François L., Strivay D., Gérard J.-C. CARAIB: A global model of terrestrial biological productivity // Global Biogeochemical Cycles. – 1994. – Vol. 8(3). – P. 255– 270.
- 127. Kindermann J., Ludeke M.K.B., Badeck F.W. Structure of a global and season carbon exchange model for the terrestrial biosphere – The Frankfurt Biosphere Model (FBM) // Water, Air and Soil Pollution. – 1993. – 70. –P. 675–684.
- 128. Plöchl M., Cramer W. Coupling global models of vegetation structure and ecosystem processes // Tellus. 1995. Vol. 47. 1-2. P. 240–250.
- 129. Kaduk J., Heimann M. A prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models // Climate Research. 1996. 6. P. 1 19.
- Thornton P.E., Law B.E. et al. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests // Agricultural and Forest Meteorology. – 2002. – 113. – P. 185-222.
- Kergoat L. A model for hydrological equilibrium of leaf area index on a global scale. // Journal of Hydrology. – 1998. – Vol. 212–213. – P. 268–286.
- Haxeltine A., Prentice C. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types // Global Biogeochemical Cycles. – 1996. – Vol. 10 (4). – P. 693–709.
- Woodward F., Thomas M. Smith, William R. Emanuel. A global land primary productivity and phytogeography model // Global Biogeochemical Cycles. – 1995. – Vol. 9 (4). – P. 471–490.

- 134. Friend A.D., Stevens A.K., Knox R.G., Cannell M.G. A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (v.3.0) // Ecological Modelling. – 1997. – Vol. 95. – P. 249–287.
- 135. Плешков Б.П. Биохимия сельскохозяйственных растений. Изд. 3-е / Борис Павлович Плешков. — М.: Колос, 1975. — 496 с.
- 136. Генкель П.А. О причинах засухоустойчивости некоторых ксерофитов и галофитов // Ботан. журн. — 1949. — Т. 34. — № 5. — С. 41—473.
- 137. Гетко Н.В. Растения в техногенной среде. Структура и функции ассимиляционного аппарата / Нелли Владимировна Гетко. Минск: Наука и техника, 1989. 197 с.
- 138. Голубев В.Н. Эколого-биологические особенности травянистых растений и растительных сообществ / В.Н. Голубев. М.: Наука, 1965. 269 с.
- 139. Измайлова Н.Н. Водный режим / Н.Н. Измайлова // Степи Восточного Хангая. М.: Наука, 1986. с. 99—126.
- 140. Касьянова Л.Н. Экология растений Прибайкалья. Водный обмен / Любовь Николаевна Касьянова. М.: Наука, 2004. 288 с.
- 141. Лархер В. Экология растений / Вольтер Лархер. М.: Мир, 1978. 184 с.
- 142. Рубин Б.А. Курс физиологии растений/ Борис Анисимович Рубин. М.: Высшая школа, 1976. 576 с.
- 143. Шпак И.С. Влияние леса на водный баланс водосборов / Иван Сергеевич Шпак. Киев: Наук. думка, 1968. — 282 с.
- 144. Reed B.C., Brown J.F., vanderZee D., Loveland T.R., Merchant J.W., Ohlen D.O. Measuring phenological variability from satellite imagery / Journal of Vegetation Science. 1994. 5, pp. 703-714.
- 145. Федоров С.Ф. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне Европейской территории СССР / Сергей Филиппович Федоров. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 248 с.
- 146. Влияние леса на водные ресурсы / [Идзон П.Ф., Пименова Г.С., Сирин А.А., Цыганова О.П.]; под ред. С.Е. Вомперского, П.Ф. Идзона. М.: Наука, 1986. 168 с.
- 147. Молчанов А.А. Лес и климат / Александр Алексеевич Молчанов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 279 с.
- 148. Молчанов А.А. Влияние леса на окружающую среду / Александр Алексеевич Молчанов. М.: Наука, 1973. 359 с.
- 149. Гулидова И.В. Транспирация деревьев и трав в зоне средней тайги и ее зависимость от метеорологических условий / И.В. Гулидова // Труды Ин-та леса АН СССР. 1958. Т. 41. С. 111—121.
- 150. Назаров Г.В. Зональные особенности водопроницаемости почв СССР / Георгий Васильевич Назаров. Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. 184 с.
- 151. Бейдеман И.Н. Справочник по расходу воды растениями в природных зонах СССР: [Справочник] / Ирина Николаевна Бейдеман. — Новосибирск: Наука, 1983. — 253 с.
- 152. Бейдеман И.Н. Расход воды растительностью и способы его расчета / И.Н. Бейдеман, З.Г. Беспалова, А.Г. Рахманина // Эколого-геоботанические и агромелиоративные исследования Кура-Араксинской низменности Закавказья. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. - С. 406-425.
- 153. Раунер Ю.Л. О гидрометеорологической роли леса / Ю.Л. Раунер // Изв. АН СССР. Сер. геогр. — 1965. — № 4. — С. 40—53.

- 154. Вершинин П.В., Мельникова Н.К., Мичурин Б.Н. Основы агрофизики. Л: Физматгиз, 1959. — 904 с.
- 155. Роде А.А. Водные свойства почв и грунтов / Алексей Андреевич Роде. М.: Изд-во АН СССР, 1955. —131 с.
- 156. Ситников А.Б. Динамика влаги в почвогрунтах зоны аэрации / Анатолий Борисович Ситников. Киев: Наук. думка, 1986. 152 с.
- 157. Родионова Н.В. Оценка параметров почвы по радарным данным с использованием эмпирической модели и декомпозиции по механизмам рассеяния / Н.В. Родионова // Исследование Земли из Космоса. 2009. №1. С. 3—8.
- 158. Сагалович В.Н. Определение влажности почвы по данным активного микроволнового дистанционного зондирования в L-диапазоне / В.Н.Сагалович, Е.Я. Альков, Т.И. Царева // Исследование Земли из Космоса.—2007. №1. С. 3—6.
- Dasgupta S. Combining MODIS and AMSR-E based vegetation moisture retrievals for improved fire risk monitoring / S. Dasgupta, J.J. Qu // Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability III; Ed. by W. Gao, S.L.Ustin. Proc. SPIE. - 2006. - 6298. -P. 275-286.
- Davidson A. Remote sensing of grassland-shrubland vegetation water content in the shortwave domain / A. Davidson, S. Wang, J. Wilmshurst // Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. — 2006. — Vol. 8. — P. 225—236.
- 161. Improving soil wetness variations monitoring from passive microwave satellite data: The case of April 2000 Hungary flood / T. Lacava, V. Cuomo, E. V. Di Leo [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 96. P. 135—148.
- 162. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование. Режим доступу: http://mapexpert.com.ua/index\_ru.php?id=20&table=news
- 163. Барталев С.А. Дистанционные методы мониторинга растительности бореальных экосистем Евразии на континентальном уровне: [Електронний ресурс]. Режим доступу до матеріалів: www.iki.rssi.ru/earth/bartalev.ppt.
- 164. Сахацький О.І. Підвищення ефективності гідрогеологічних прогнозів з використанням водних індексів мультиспектральних супутникових зйомок // Геол. журн. — 2007. — № 4. — С. 42—47.
- 165. Сахацький О.І. Методологія використання матеріалів багатоспектральної космічної зйомки для вирішення гідрогеологічних задач: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра геол. наук, спец. 05.07.12 - Дистанційні аерокосмічні дослідження / О.І. Сахацький. — К., 2010. — 39 с.
- 166. Chen D. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands / D. Chen, J. Huang, T.J. Jackson // Remote Sensing of Environment. — 2005. — Vol. 98. — P. 225—236.
- 167. Clevers J.G.P.W. Using spectral information at the NIR water absorption features ti eatimate canopy water content and biomass / J.G.P.W. Clevers, L.Kooistra // Proc. Mid-Term Symposium ISPRS "Remote Sensing: From Pixels to Processes", Enschede, the Netherlands, 8-11 May 2006. — Enschede: 2006.
- 168. Gao B.C. NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space / B.C. Gao // Remote Sensing of Environment. —1996. — Vol. 58. — P. 257—266.

- 169. Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes / Y.-B. Cheng, P.J. Zarco-Tejada, D. Riano [et al.] // Remote Sensing of Environment. - 2006. - Vol. 105. - P. 354-366.
- 170. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions / Proc. 18<sup>th</sup> Conf. Agricaltural and Forest Meteorology, West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc., 1987, pp. 103-107.
- 171. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Климатология засухи на юго-востоке Русской равнины по спутниковым данным / Исследование Земли из космоса, 2004, № 1, с. 83-89.
- 172. Lui W.T., Kogan F.N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. Int. Journal of Remote Sensing, 1996, 17, pp. 2761–2782.
- 173. Kogan F.N. Global drought watch from space // Bulletin of the American Meteorological Society. 1997. № 78. P. 621-636.
- 174. McVicar T.R., Jupp D.I. Estimating meteorological data at the times of remotely sensed data acquisition from standard daily meteorological data / Agricultural and Forest Meteorology. 1998. – Vol. 96. – P. 219-238.
- 175. Сахацький О.І., Станкевич С.А. До можливостей оцінювання зволоженості земного покриття за багатоспектральними космічними зображеннями оптичного діапазону на прикладі території України // Доповіді НАН України, 2007.– № 11.– С.122-128.
- 176. Biewer S., Erasmi S., Fricke T., Wachendorf M. Prediction of yield and the contribution of legumes in legume-grass mixtures using field spectrometry // Precision Agriculture. – 2009. –Vol. 10, № 2. – P. 128-144.
- 177. Eitel J.U.H., Long D.S., Gessler P.E., Smith A.M.S. Using in-situ measurements to evaluate the new RapidEye satellite series for prediction of wheat nitrogen status // Int. Journal of Remote Sensing. – 2007. – Vol. 28, № 18. – P. 4183 - 4190.
- 178. Herrmann I., Pimstein A., Karnieli A., Cohen Y., Alchanatis V., Bonfil D.J. LAI assessment of wheat and potato crops by VENµS and Sentinel-2 bands // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115, № 8. P. 2141-2151.
- 179. Dash J., Curran P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // Int. Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 25. P. 5403-5413.
- Horler D.N.H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance // Int. Journal of Remote Sensing. – 1983. – Vol. 4. – P. 273-288.
- 181. Gitelson A., Merzlyak M.N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of Aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation / Journal of Plant Physiology. - 1994. - Vol. 143. - P. 286-292.
- 182. Яценко В.А., Кочубей С.М., Хандрига П.А, Донец В.В., Семенив О.В. Новый метод дистанционного оценивания содержания хлорофилла в растительности и его программно-аппаратная реализация // Космічна наука і технологія. – 2007.– Т. 13. № 3. – С. 35-44.
- 183. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сахацький О.І., Сибірцева О.М., Дугін С.С., Григоренко В.В. Зіставлення супутникових та наземних гіперспектральних даних при визначенні позиції червоного краю спектрів відбиття / Космічна наука і технологія. 2010. Т. 16, № 3. С. 39- 45.

- 184. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., Дугін С.С., Воробйов А.І. Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем // Космічна наука і технологія. – 2010.– Т. 16, № 6. – С. 5-10.
- 185. Моргун В.В., Литвиненко В.Ф. Мутационная селекция пшеницы. К.: Наукова думка, 1995. 627 с.
- 186. Носатовский А.И. Пшеница. М.: Колос, 1965. 568 с.
- 187. Зінченко О.І., Салатенко В.Н., Білоножко М.А. Рослинництво. К.: Аграрна освіта, 2001. 591 с.
- 188. Тарчевский И.А., Андрианова Ю.С. Содержание пигментов как показатель развития фотосинтетического аппарата у пшеницы // Физиология растений. – 1980. – Т. 27. Вып. 2. – С. 341-347.
- 189. Лэмб Ч.А. Пшеница и ее улучшение. М.: Колос, 1970. С. 228-230.
- 190. Кожушко Н.М., Мережко А.Ф. Чернышова С.В. Физиологические особенности остистых и безостых изолиний яровой пшеницы в условиях засухи // Вестник сельскохозяйственной науки. –1986. № 11. С. 79-82.
- 191. Прядкіна Г.О. Онтогенетична динаміка параметрів фотосинтетичного апарату посівів озимої пшениці різних за зерновою продуктивністю генотипів // Особливості фотосинтезу і продукційного процесу у високоінтенсивних генотипів озимої пшениці. – К.: Основа, 2011. – С. 64-73.
- 192. Соколовская-Сергиенко О.Г., Киризий Д.А. Углекислотный газообмен и активность супероксиддисмтазы флаговых листьев различных сортов озимой пшеницы // Вісник Укр. тов-ва генетиків і селекціонерів. 2010. Т. 8, № 1. С. 46-50.
- 193. Watson D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years / D. J. Watson // Annals of Botany,1947. Vol. 11. № 1. P. 41–76.
- Chianucci F. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: current controversies and opportunities / F. Chianucci, A. Cutini // iForest–Biogeosciences and Forestry. – 2012. – Vol. 5(6). – P. 290–295.
- 195. Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography / I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin // Agricultural and Forest Meteorology. – 2005. – Vol. 132(1). – P. 96 – 114.
- 196. Frazer G. W. Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs / G. W. Frazer // Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, CANADA; Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, N.Y., USA. – 1999. – Vol. 36. – P. 20-21.
- 197. Seber G. A. F. Linear Regression Analysis. 2 ed. / G. A. F. Seber, A. J. Lee // N.Y.: Wiley & Sons, 2003. 582 p.
- La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali / A. Barilotti, S. Turco, R. Napolitano, E. Bressan // 15th Meeting of the Italian Society of Ecology, Torino, Italy, 2005. – 6 p.
- 199. Словарь ботанических терминов / Под. ред. И.А. Дудки. К.: Наук. думка, 1984. 308 с.
- 200. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm. Version 2.0 / [F. A. Heinsch, M. Reeves, P. Votava et al.]. – 2003. – 57 pp. Mode of access

: http://secure.ntsg.umt.edu/projects/files/documents/MOD17UsersGuide.pdf . – Title from the screen.

- 201. Дрё Ф. Экология / Ф. Дрё. М.: Атомиздат, 1976. 168 с.
- 202. Закон України «Про охорону земель» (ст.) м. Київ, 19 червня 2003 року N 962-IV.
- 203. Кобак К. И. Биотические компоненты углеродного цикла / К. И. Кобак. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 248 с.
- 204. Паламарчук М. М. Географія України: Підр. для серед. шк. 2-ге вид., перероблене і доповнене / М. М. Паламарчук. К.: Освіта, 1992. 159 с.
- 205. Classification of space images for forest state identification within the Siberia region (Part 1) / [A. I. Sakhatsky, V. I. Lyalko, A. Ja Khodorovsky et al.]. Laxenburg: Austria, IIASA, IR-02-29 / April 2002. 45 p.
- 206. Earth observation of Ukraine and Siberia for an estimation of their state, fire risk and carbon cycle / [V. I. Lyalko, S. Nilsson, A. I. Sakhatsky et al.] // New Strategies for European Remote Sensing. ; ed. M. Oluic. Rotterdam, Millpress, 2005. P. 269—277.
- 207. Evaluation of MODIS GPP over a complex ecosystem in East Asia: A case study at Gwangneung flux tower in Korea [Electronic recourse] / [C. Shima, J. Hong, J. Hong et al.] // Advances in Space Research. 2014. Vol.54(11). P.2296—2308.
- 208. Evaluating Parameter Adjustment in the MODIS Gross Primary Production Algorithm Based on Eddy Covariance Tower Measurements [Electronic recourse] / J. Chen, H. Zhang, Z. Liu, M. C. B. Chen // Remote Sensing. — 2014. — Vol.6(4). — P. 3321—3348.
- 209. Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis / [M. K. Griffin, S. M. Hsu, H. K. Burke et al.]
  // Lincoln Laboratory Jurnal. 2005. Vol. 15. P. 271—296.
- 210. Сахацкий А. И. Методологія використання матеріалів багатоспектральної космічної зйомки для вирішення гідрогеологічних задач: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня докт. геол. наук. спец. 05.07.12, "Дистанційні аерокосмічні дослідження " — К., 2009. — 39 с.
- 211. ГОСТ 28268-89 Почвы: Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений // МІЖДЕРЖАВНІ СТАНДАРТИ СНД: Группа 13.080 Качество почвы. Подгруппа 13.080.40 Гидрологические свойства почв.
- 212. Gao B. C. NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space / B. C. Gao // Remote Sensing of Environment. — 1996. — Vol. 58(3). — P. 257—266.
- 213. Maffei C. A MODIS-based perpendicular moisture index to retrieve leaf moisture content of forest canopies / C. Maffei, M. Menenti // International journal of remote sensing. — 2014. — Vol. 35 (5). — P. 1829—1845.
- 214. Сахацький О. І. Досвід використання водних індексів супутникових зйомок TERRA/MODIS для моніторингу засухи південних районів України на прикладі вегетаційного періоду 2007 року / О. І. Сахацький // Доповіді НАН України. — 2008. — № 5. — С. 127 — 130.
- 215. Vermote E. F. MODIS Surface Reflectance User's Guide [Electronic recourse] / E. F. Vermote, S. Y. Kotchenova and J. P. Ray // MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility, Version 1.3. 2011. 40 p. Mode of access : http://modis-sr.ltdri.org/products/MOD09\_UserGuide\_v1\_3.pdf. Title from the screen.

- 216. Gillespie A. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images / A. Gillespie, S. Rokugawa, T. Matsunaga, J.S. Cothern, S. Hook, A.B. Kahle // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.- 1998.- Vol.36.- No.4.- P.1113-1126.
- 217. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники/ Л.З. Криксунов.– М.: Советскоерадио, 1978.– 400 с.
- 218. Schmugge T. Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations / T. Schmugge, A. French, J.C. Ritchie, A. Rango, H. Pelgrum // Remote Sensing of Environment.- 2002.- Vol.79.- No.2-3.- P.189-198.
- 219. Шульгин И. А. Энергетический баланс и физиологические критерии продуктивности посевов сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата / И.А. Шульгин // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Труды Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН – М.: 2013, Т. 25. – С. 224-250.
- 220. Ерошенко Ф.В. Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала / Ф.В. Ерошенко, С.А. Барталев, И.Г. Сторчак, Д.Е. Плотников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 99-112.
- 221. Андрианова Ю.Е. Хлорофилл и продуктивность растений / Ю.Е. Андрианова, И.А. Тарчевский. М.: Наука, 2000. 135 с.
- 222. Asner G.P. Global synthesis of leaf area index observations / G.P. Asner, J.M. Scurlock, J.A. Hicke // Global Ecology & Biogeography, 2003. – Vol. 12, – P. 191–205.
- 223. Tillack A. Estimation of the seasonal leaf area index in an alluvial forest using high-resolution satellite-based vegetation indices / A. Tillack, A. Clasen, B. Kleinschmit, M. Forster // Remote Sensing of Environment, 2104. Vol. 141, P. 52-63.
- 224. Eriksson H. Estimating LAI in deciduous forest stands / H. Eriksson, L. Eklundh, K. Hall, A. Lindroth // Agricultural and Forest Meteorology, 2005. – Vol. 129, – P. 27–37.
- 225. Cohen W.B. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data / W.B. Cohen, T.K. Maiersperger, S.T. Gower, D.P. Turner // Remote Sensing of Environment, 2003. – Vol. 84, – P. 561–571.
- 226. Dufrêne E. Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods / E. Dufrêne, N. Bréda // Oecologia, 1995. Vol. 104, P. 156–162.
- 227. Станкевич С.А. Дистанційна оцінка якісного стану рослинності на міських територіях на прикладі НПП «Голосіївський» / С.А. Станкевич, І.О. Пєстова, О.О. Година, Р.С. Філозоф // Електронний журнал «Наукові доповіді НУБіП України». 2015-2(51). 12 с.
- 228. 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.
- 229. 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.
- Stankevich S.A. Infrared satellite imaging for the study of urban heat islands in Ukraine / S.A. Stankevich, V.E. Filippovich // Proceedings of 8<sup>th</sup> International Green Energy Conference (IGEC-8).– Kiev: NAU, 2013. – P. 219-223.

- 231. Ibarra-Castanedo C. Infrared image processing and data analysis / C. Ibarra-Castanedo, D. González, M. Klein, M. Pilla, S. Vallerand, X. Maldague // Infrared Physics & Technology. 2004. Vol. 46.– No. 1-2.– P. 75-83.
- 232. Chander G. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors / G. Chander, B.L. Markham, D.L. Helder // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. No. 5. P. 893-903.
- 233. Исидоров В.А. Экологическая химия: учебное пособие для вузов / В.А. Исидоров. Спб: Химиздат, 2001. 304 с.
- 234. Dubuisson P. Fast radiative transfer modeling for infrared imaging radiometry / P. Dubuissona, V. Giraudb , O. Chomettec , H. Chepferc , J. Pelon // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2005. Vol. 95. No. 2. P. 201-220.
- 235. Yang H. Algorithm of emissivity spectrum and temperature separation based on TASI data / H. Yang, L.F. Zhang, X. Zhang, C. Fang, Q. Tong // Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 15. No. 6.– P. 1242-1254.
- 236. Barsi J.A. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band Earthsensing instrument / J.A. Barsi, J.L. Barker, J.R. Schott // Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARRS'03). – Toulouse: IEEE, 2003. – P. 3014-3016.
- 237. Баранов В.Л. Алгоритм автоматизованого оцінювання спектрального коефіцієнта теплового випромінювання / В.Л. Баранов, С.В. Водоп'ян, Р.В. Грищук // Вісник ЖДТУ. 2006. № 4(39). С. 77-83.
- 238. Snyder W.C. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space / W.C. Snyder, Z. Wan, Y. Zhang, Y.-Z. Feng // International Journal of Remote Sensing. – 1998. – Vol. 19. – No. 14. – P. 2753-2774.
- 239. Perez Hoyos I.C. Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity / I.C. Perez Hoyos // International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. 2014. Vol. 2. No. 2. P. 26- 30.
- 240. Krylova H.B. Remote monitoring of the thermal field at urbanized area, taking Kyiv city as an example / H.B. Krylova, N.S. Lubskiy // Proceeding of 3<sup>rd</sup> International Conference on GIS and Remote Sensing. Tsaghkadzor: Environmental Research and GIS Center, 2014. P. 149-156.
- 241. Станкевич С.А. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки / С.А. Станкевич, В.Е. Филиппович, Н.С. Лубский, А.Б. Крылова, С.Г. Крицук, О.В. Бровкина, В.И. Горный, А.А. Тронин // Український журнал дистанційного зондування Землі. – 2015. – № 7. – С. 14-23.
- 242. Станкевич С.А. Підвищення просторової розрізненності аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень / С.А. Станкевич, С.В. Шкляр, М.С. Лубський // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. Вип. 9(16). Київ: ДНДІА, 2013. С. 110-117.