

УДК 504.064.3:528.8:(535.33:581.45)(477-25)

Застосування спектральних індексів спектрограм листя дерев для оцінки екологічних умов їхнього росту в м. Києві

В. Г. Якимчук, Л. П. Ліщенко, К. Ю. Суханов, А. Ю. Порущкевич*

Державна установа "Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної Академії Наук України", Київ, Україна

Отримана порівняльна характеристика оцінки екологічного стану довкілля за спектрограмами листя деревної рослинності за допомогою адаптивного спектрального індексу (АСІ). Значення інформативних довжин хвиль АСІ розраховані, виходячи з умови максимальної відстані між середніми значеннями індексів для різних районів м. Києва. АСІ обчислені для спектрограм листя клена, тополі та ясеня.

Ключові слова: стан довкілля, спектральні індекси рослинності, спектрорадіометр Fieldspec 3 FR

© В. Г. Якимчук, Л. П. Ліщенко, К. Ю. Суханов, А. Ю. Порущкевич. 2015

Вступ

Несприятливий екологічний стан довкілля урбанізованих територій, особливо великих агломерацій, спровокований інтенсивністю автотранспорту та містобудівною техногенною діяльністю. Забруднення компонентів навколишнього середовища й безпосередньо рослинного покриву розподіляється на території міста нерівномірно і залежить від багатьох факторів. Для визначення особливостей прояву різної міри забруднення рослинності на урбанізованих територіях і для формування методико-технологічних схем моніторингових досліджень екологічного стану в міському середовищі необхідна розробка оперативних методів оцінки ступеня антропогенного впливу. Для цього пропонується використовувати дані дистанційного та польового спектрометрування рослинності на різних за екологічними характеристиками ділянках.

Критеріями, згідно яких проводилось виділення ділянок, стали наступні ознаки:

- фізико-географічне розташування (середмістя, північна, південна, східна, західна частина міста, передмістя);
- ландшафтна відповідність (природно-територіальні комплекси);
- функціональний тип використання (функціональні зони міста);
- еколого-мікрокліматичне районування міста;
- наявність певної екологічної ознаки (забруднення ґрунтів, повітря, водних об'єктів, складування сміття, несприятливі екзогенні процеси).

Проведення вимірювань і аналіз даних спектрометрування.

Для обстеження та спектрометрування на території м. Києва були обрані ділянки, екологічно

відносно безпечні з мало зміненими в результаті антропогенної діяльності компонентами (рослинність, вода, ґрунти):

а) ділянки біля озера Міністерка на північній околиці міста (далі — Міністерка);

б) ділянка в районі Жуків Острів на південній околиці міста;

в) ділянка на острові Гідропарк, заплава Дніпра, середмістя Києва (далі — Гідропарк).

Також були намічені й обстежені тестові ділянки, які відповідають територіям, пов'язаним із промисловими зонами або великими автомагістралями, які мають різний ступінь забруднення:

г) біля озера Нижній Опечень (Петрівка), північний район міста (далі — Опечень);

д) на перетині Дніпровської набережної та проспекту Дружби Народів, район середмістя (далі — Дружби Народів);

е) біля транспортної розв'язки вул. Саперно-Слобідської та Столичного шосе, в долині р. Либідь, біля північного схилу Лисої гори (далі — Саперно-Слобідська);

ж) біля метро Харківська, західний берег озера Вирлиця на проспекті Бажана (далі — Харківська).

Спектрометрування листя проводилось контактно 11 жовтня 2012 року. Гіперспектральна зйомка виконана спектрорадіометром Fieldspec® 3 FR у діапазоні 350–2500 нм у спектральних зонах з величиною смуги 1 нм. При зйомці отримані характеристики спектральних значень листя деревної рослинності, а саме тополі, ясеня і клена.

Місцезнаходження ділянок, де проведений відбір зразків для спектрометрування показано на рис. 1.

В результаті спектрометрування були отримані спектри відбиття листя ясеня, клена, тополі для всіх ділянок, які відрізняються між собою за едафічними та екологічними умовами. Порівняння спектральних кривих показало, що на тестових та еталонних ділянках існує суттєва різниця значень спект-

* e-mail: a.porushkevich@ujrs.org.ua



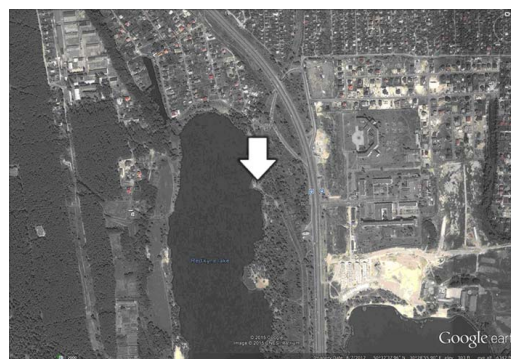
a



b



c



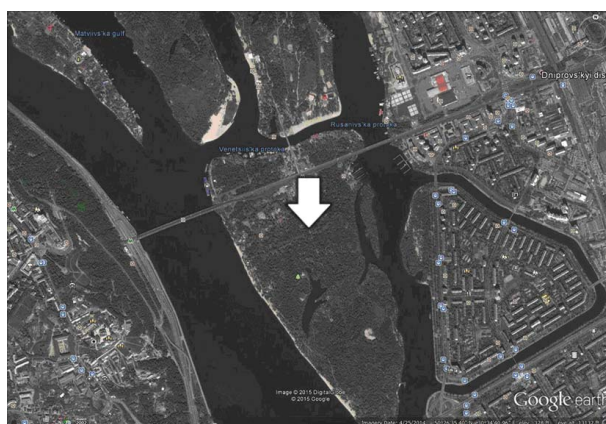
d



e



f



g

Рис. 1. Місцезолення ділянок: (a) — Саперно-слобідська, (b) — Харківська, (c) — Опечень, (d) — Дружби Народів, (e) — Міністерка, (f) — Жуків острів, (g) — Гідропарк

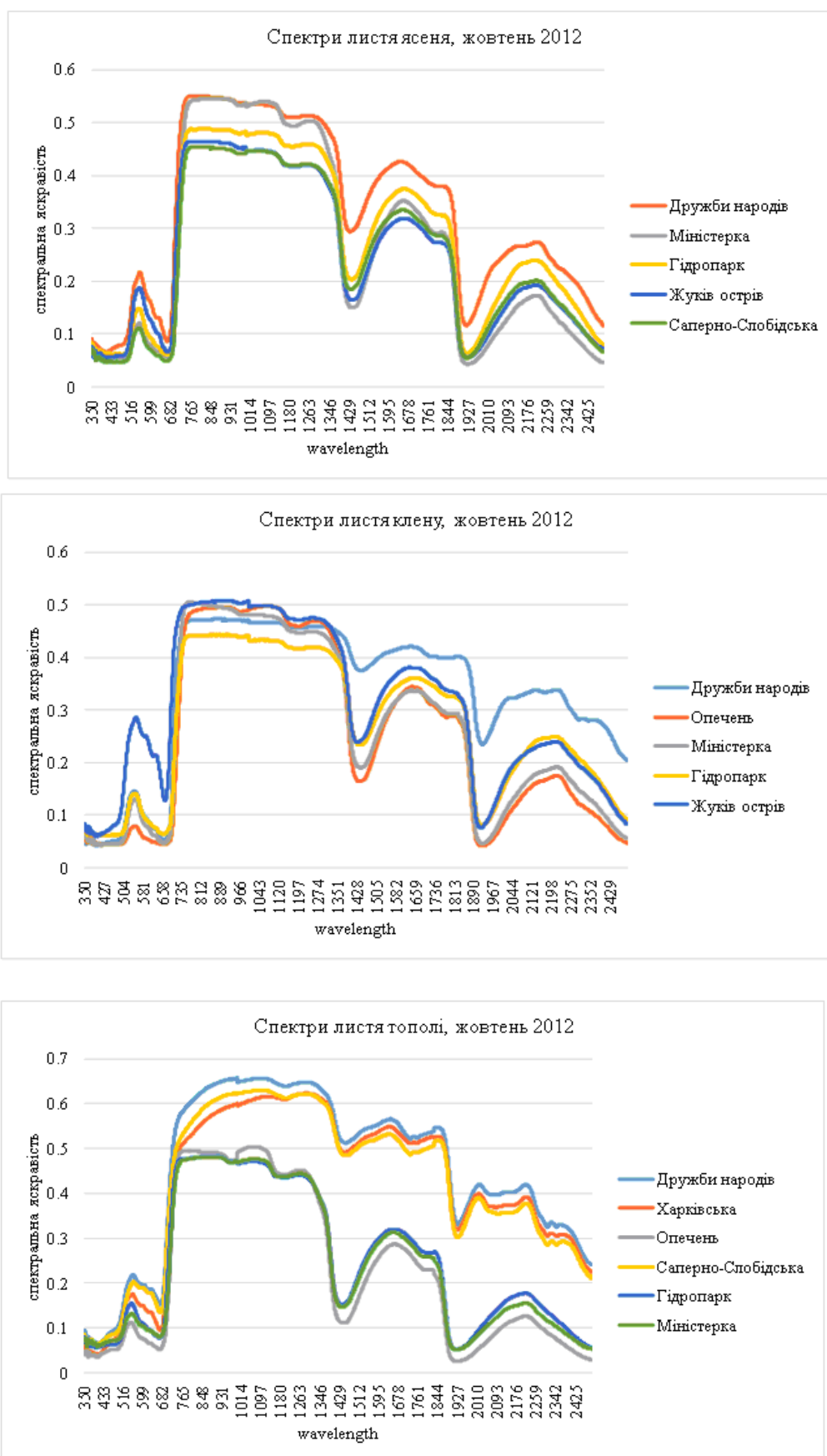


Рис. 2. Спектрограми листя ясеня, клену, тополі від 12 жовтня 2012 р.

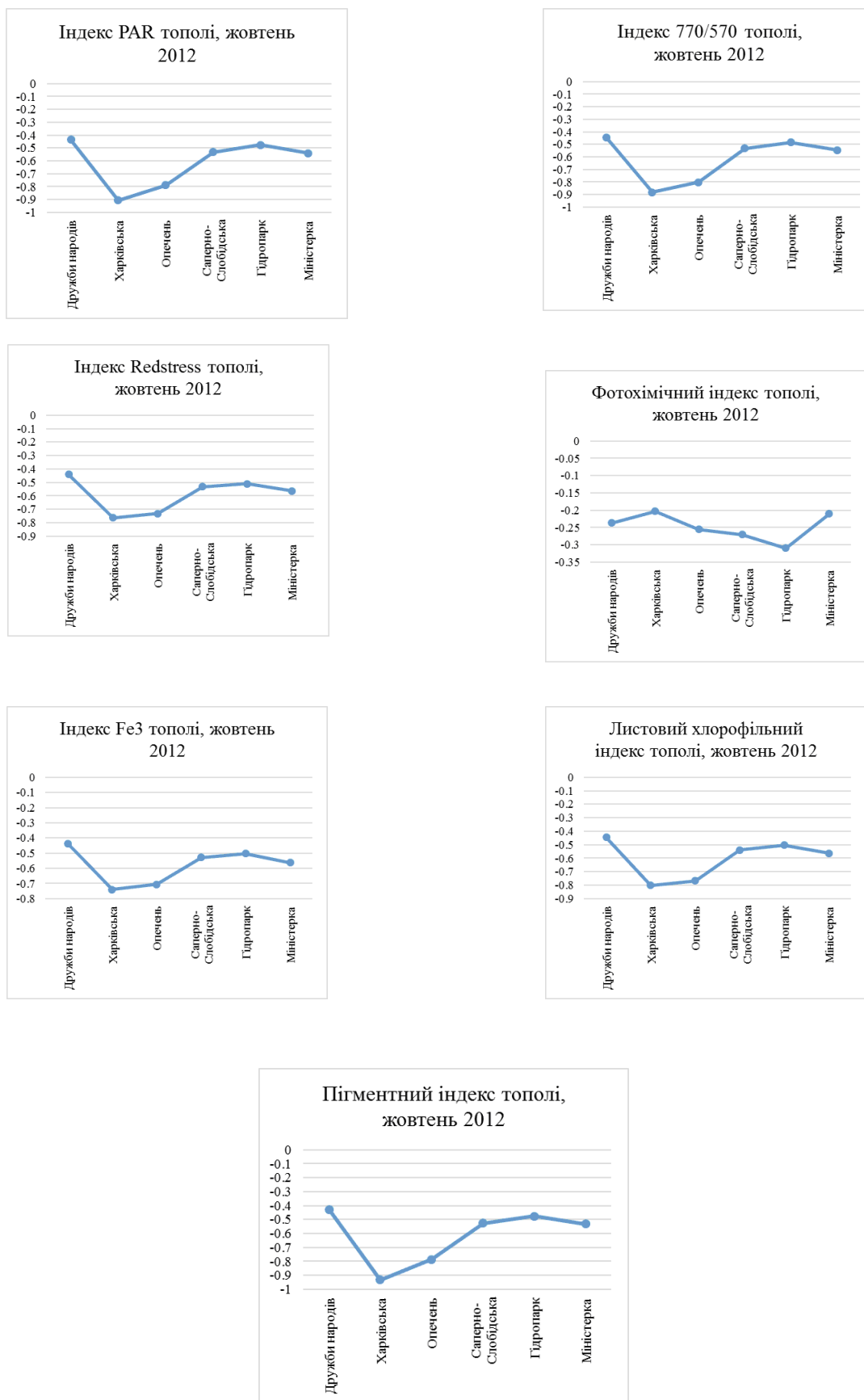


Рис. 3. Графіки різних індексів для тополі

рального відбиття (рис. 2). Спектральні криві у зеленому і червоному діапазонах мають відмінність в сигнатурі за рахунок вегетаційних показників і, можливо, за рахунок забрудненості повітря. Нажаль, лабораторні хімічні аналізи цих зразків не проводилися.

З усіх вегетаційних індексів, які представлені на сайті [6], який найбільш повно об'єднує всі доступні індекси для кількісних розрахунків стану листка, були вибрані наступні: різницевий хлорофільний, листовий, модифікована позиція червоного краю, індекси Вогельмана, вміст пігментів, вміст важких металів, ПАР, фотохімічний. Ці індекси найбільше підходять для оцінювання рослинності в стані стресу, коли у листках відбуваються зміни пігментів, каротиноїдів і антоціанів, води, целюлози, які у великій кількості знаходяться в пригніченій рослинності та накопичення важких металів на забруднених ділянках.

Як видно з графіків побудованих за цими індексами (рис. 3), наприклад, для листків тополі на 6 ділянках очікуваної залежності не встановлено. Ділянки Опечень і Харківська мають найнижчі показники, а Дружби Народів найвищі для більшості індексів.

Фотохімічний індекс для тополі найнижчий лише в Гідропарку, тоді як Харківська та Міністерка мають найвищі показники.

Для листя ясеня встановлено, що максимум важких металів та ПАР на Саперно-Слобідській та, чомусь, на Міністерці, а мінімальні, як і очікувалось на Жуковому острові. Для листя клену Опечень, Міністерка, Гідропарк — на одному рівні, а Дружби Народів і Жуків острів мають нижчі показники майже по всіх індексах, тому очевидного поділу за індексними показниками на чисті і забруднені ділянки не встановлено — очевидно на стан листка впливає більше факторів ніж було враховано — мікрокліматичні характеристики, ґрунт, вологість, вік дерева тощо.

Проблема

Головними факторами, які впливають на спектральні характеристики рослин, є пігменти, які відіграють виняткову роль у житті рослин, особливості внутрішньої будови листя, загальний вміст води [1]. У синій та червоній зоні спектра відбивна здатність рослин дуже низька, у зеленій зоні енергії відбивається більше, а в близькому інфрачервоному діапазоні спостерігаються максимальні значення коефіцієнтів відбиття для рослинності. Обумовлені вони особливостями внутрішньої будови листя і пов'язаними з ним високою пропускну та відбивною здатністю, при дуже низькому поглинанні енергії. У середньому інфрачервоному діапазоні сильний вплив на форму спектральної кривої мають смуги поглинання води в довжинах хвиль 1.4, 1.9 і 2.7 μm .

Більша частина падаючої енергії поглинається водою, наявною в листі, а інша її частина відбивається.

Гіперспектральна інформація вимагає нових підходів до аналізу даних, наприклад, для дешифрування гіперспектральних знімків застосовується спектральна функція зсуву по довжині хвилі електромагнітного випромінювання, як інтегральний показник спектральних характеристик елементів ландшафтів [7]. Значення кута нахилу спектральної функції зсуву зростає зі збільшенням частки рослинності на знімку й зменшенням ділянок без рослинності (ґрунт, дороги, дахи.).

Ефективність досліджень гіперспектральних знімків і спектрограм багато в чому визначається методами тематичної обробки даних зондування. Основною при тематичній обробці, безумовно, є система класифікації, при якій використовуються алгоритми контрольованої й неконтрольованої класифікації багатоспектральних даних [4, 2]. Центральне питання інтерпретації даних безпосередньо пов'язане із проблемою вибору адекватного алгоритму розпізнавання. Труднощі, які при цьому виникають обумовлені невідповідністю структури реальних даних моделі, яка використовується в алгоритмі розпізнавання.

Досвід автоматизованого розпізнавання спектрограм показує, що заздалегідь практично неможливо встановити, який алгоритм буде кращий з погляду точності класифікації. Тому доцільно вибір оптимального алгоритму проводити емпірично на етапі навчання за результатами класифікації тестових даних. Обраний алгоритм використовується потім для розпізнавання всього набору векторів вимірювань.

На сьогодні існує багато варіантів спектральних індексів. Вони підбираються експериментально (емпіричним шляхом), виходячи з відомих особливостей кривих спектральної відбивної здатності рослинності й ґрунтів.

Метод

Пропонується інформативні спектральні характеристики стану довкілля встановлювати на основі спектрального індексу — показника, що розраховується в результаті операцій з різними спектральними діапазонами (каналами) даних наземного зондування. В роботі [4] описано застосування адаптивного спектрального індексу (Adaptive Spectral Index - ASI), для якого визначаються оптимальні довжини хвиль, виходячи з умови максимального модуля різниці між значеннями індексів для еталонних точок на ділянках, газоновість яких підтверджується бурінням, і для ділянок без покладів вуглеводнів.

Розглянемо задачу дослідження стану довкілля м. Києва за матеріалами спектрометрування листя дерев для випадку двох класів територій: перший $ASI(s_i)$ і другий $ASI(s_j)$. У кожному класі є кілька

об'єктів. Передбачається побудувати алгоритм класифікації на основі адаптивних спектральних індексів.

Адаптивний спектральний індекс відмінності для еталонних точок двох ділянок визначається за оптимальними довжинами хвиль, які визначають стосовно умови максимальної відстані між середніми значеннями спектрального індексу на двох ділянках $ASI(c_i)$ і $ASI(c_j)$ з урахуванням їх середньоквадратичних відхилень.

Визначення оптимальних довжин хвиль λ_p і λ_q ($p = 1, 2, \dots, P - 1$), $q = 2, 3, \dots, P$, де P — кількість спектральних каналів, проводиться по наведеному далі алгоритму. Для спектрів, отриманих на першій ділянці ASI , визначається відповідно до виразу:

$$ASI(c_i) = \frac{L(\lambda_p, c_i) - L(\lambda_q, c_i)}{L(\lambda_p, c_i) + L(\lambda_q, c_i)} \quad (1)$$

де c_i — точки першої ділянки, $i = 1, 2, \dots, I$, $p = 1, 2, \dots, P - 1$, $q = 2, 3, \dots, P$.

Для спектрів, отриманих на другій ділянці визначається відповідно до виразу:

$$ASI(s_j) = \frac{L(\lambda_p, s_j) - L(\lambda_q, s_j)}{L(\lambda_p, s_j) + L(\lambda_q, s_j)} \quad (2)$$

де s_j — точки другої ділянки $j = 1, 2, \dots, J$.

На основі середніх значень SI для першої ділянки $ASI(C)$ та другої $ASI(S)$ — обчислюється модуль їх різниці M_n :

$$M_n = |ASI(C) - ASI(S)| \quad (3)$$

Для підвищення точності ухвалення рішення про відмінність ділянок та врахування варіабельності значень індексів уздовж точок ділянки визначаються середньоквадратичні відхилення σ для $ASI(c_i)$ й σ $ASI(s_j)$.

Для множини N впорядкованих пар значень λ_p і λ_q відліків складаємо декартовий добуток N^2 [2] і обчислюємо значення

$$M = \frac{|\Delta ASI| - \sigma[ASI(C)] - \sigma[ASI(S)]}{|\Delta ASI|} \quad (4)$$

Значення (4) обчислюємо між усіма парами i -х точок першої ділянки й j -х точок другої ділянки, з отриманих значень $M_n(i, j)$ вибираємо найбільші, для яких фіксуємо пари довжин хвиль $\lambda_p(i, j)$ і $\lambda_q(i, j)$.

Класифікацію екологічного стану за спектрограмами листя дерев пропонується виконувати в просторі адаптивних спектральних індексів, що визначають відмінність першої й другої ділянки $M_n(i, j)$, обчислених за виразом (4), осі визначаються як відповідні значення пари довжин хвиль $\lambda_p(i, j)$ і $\lambda_q(i, j)$.

Алгоритм ухвалення рішення про екологічний стан за спектрограмами листя дерев по віднесенню до певного класу й об'єкту усередині класу побудо-

ваний на підставі визначення найближчого з отриманого при навчанні об'єкта.

Експеримент

Спектрограми листя дерев відображають стан елементів навколишнього середовища ґрунту й повітря. Дані про склад повітря в точках наземного спектрометрування одержані в Центральній геофізичній обсерваторії [8]. Пости Центральної геофізичної обсерваторії, які знаходяться недалеко від досліджуваних ділянок і місць зняття спектрів наведені в таблиці 1 і в таблиці 2 — характеристики забруднення повітря, які графічно представлені на рис. 4.

Дані [3] показують (таблиця 2, рис. 4), що хімічний склад повітря різних постів незначно відрізняється, за винятком поста 20 (вул. Саперно-Слобідська, у таблиці 2) за наявністю вуглецю. Отже, за спектрограмами листків дерев необхідно визначити інформативні ознаки, за якими можна класифікувати місця, які відрізняються кількістю вуглецю, і ще проаналізувати спектрограми інших постів на їх відмінність, яка може відображати інші повітряні домішки й склад ґрунту.

Для трьох порід дерев обчислюються відмінності пар ділянок $M_n(i, j)$, обчислені за формулою (4) та відповідні значення пари довжин хвиль $\lambda_p(i, j)$ і $\lambda_q(i, j)$, які представлені нижче на рисунках з позначеннями $WL1$ і $WL2$. Рис. 5 показує, що листя тополі на Саперно-Слобідський має порівняно більші значення M з такими ділянками, як Гідропарк ($M = 0.80$), Міністерка ($M = 0.80$) і Опечень ($M = 0.80$) і менші M з ділянками Харківське ($M = 0.23$) і Дружби народів ($M = 0.16$). Ці значення M розділяють усі ділянки стосовно Саперно-Слобідської на подібні з меншими значеннями M і не подібні — з більшими значеннями M . Останнє добре узгодиться з уявленнями про зазначені місця м. Київ. Ці ж уявлення про подібність точок спектрометрування добре узгоджуються з Рис. 6, так Дружба народів мало відрізняється від Харківської ($M = 0.21$) на протилежності від Гідропарку ($M = 0.82$), Міністерки ($M = 0.84$) і Опечня ($M = 0.95$). Рис. 7 демонструє відмінність Харківської від Гідропарку ($M = 0.92$), Міністерки ($M = 0.93$) і Опечня ($M = -1.06$). Рис. 8 і рис. 9 показують подібність Міністерки з Гідропарком ($M = 0.15$) і Опечнею ($M = 0.22$), а також Опечні з Гідропарком ($M = -0.25$ $M = -0.25$). Також слід звернути увагу на знаки: Саперно-Слобідська з Гідропарком, Міністерка і Опечень мають додатне значення; Дружба народів та Харківська з Гідропарком, Міністеркою і Опечнем — від'ємне значення.

Листя ясеня не має настільки значущих розходжень між різними породами (рис. 10–13), що, імовірно, обумовлене незначним поглинанням домішок з повітря, а тільки впливом ґрунту.

Листя клену на Дружбі народів (рис. 14) має порівняно більші значення M з такими ділянками, як

Таблиця 1.
Пости Центральної геофізичної обсерваторії

Розташування поста	Дружби народів	Харківська	Гідропарк	Опечень	Саперно-Слобідська
Номер посту	8	9	15	17. 21	20

Таблиця 2.
Характеристика забруднення повітря: середня концентрація, $г/м^3$

Назва домішки	Код домішки	Пости м. Києва					
		8	9	15	17	20	21
завислі речовини	1	0.1158	0.1598	0.0988	0.1032	0.1043	0.1494
діоксид сірки	2	0.0158	0.0157	0.0159	0.0184	0.0191	0.178
оксид вуглецю	4	1.2293	1.0577	1.164	1.0511	29059	1.1727
діоксид азоту	5	0.0985	0.1253	0.0655	0.1219	0.1392	0.1395
фенол	10	0.004	0.0038		0.0047		0.0044
аміак	19		0.0084		0.0094	0.0119	0.0091
формальдегід	22	0.0075	0.0079		0.0081	0.0112	0.0094

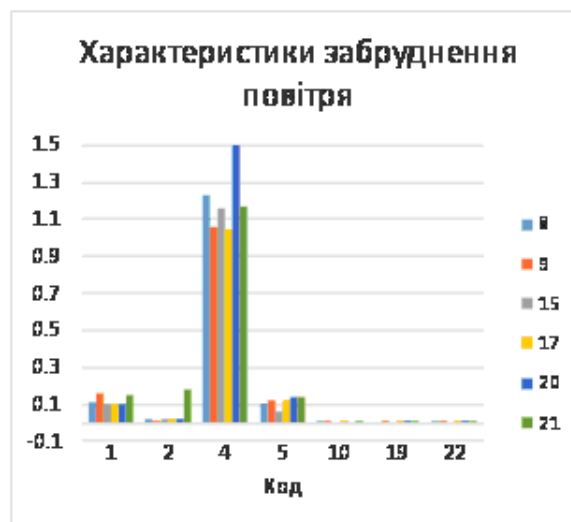
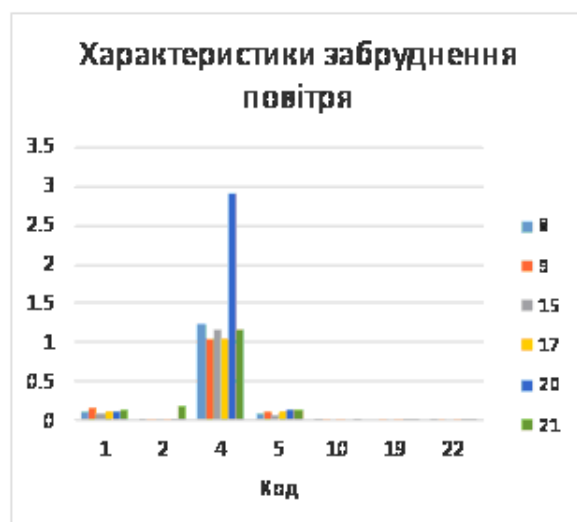


Рис. 4. Характеристики забруднення повітря (а) та фрагмент в збільшеному масштабі (б)

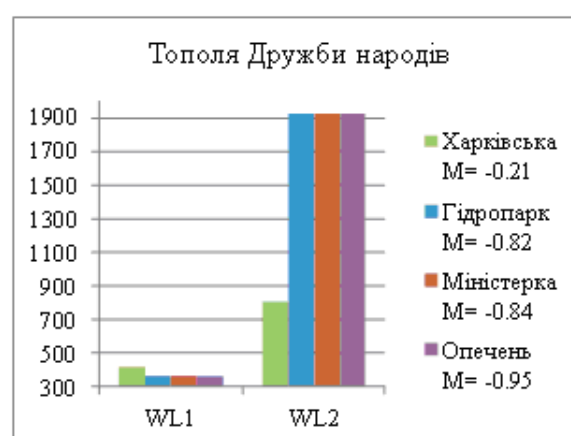
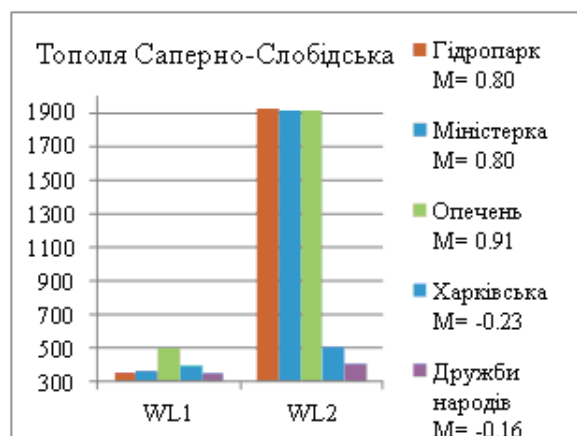


Рис. 5

Рис. 6

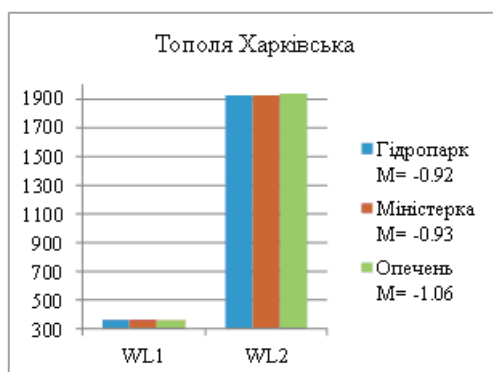


Рис. 7

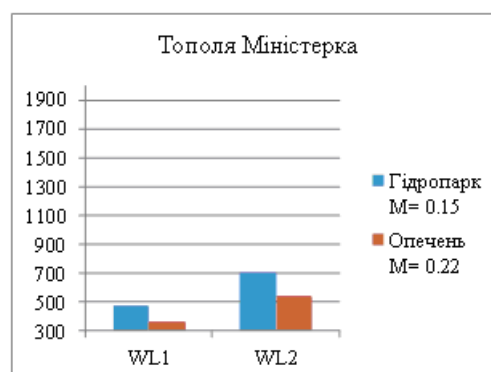


Рис.8



Рис.9

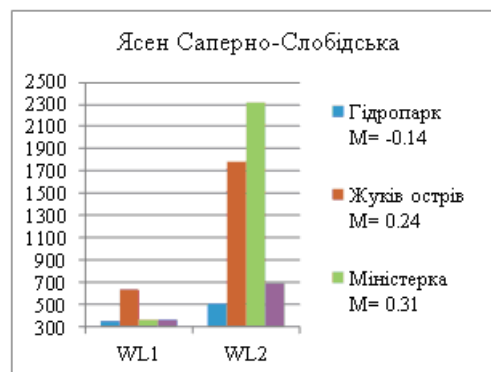


Рис.10

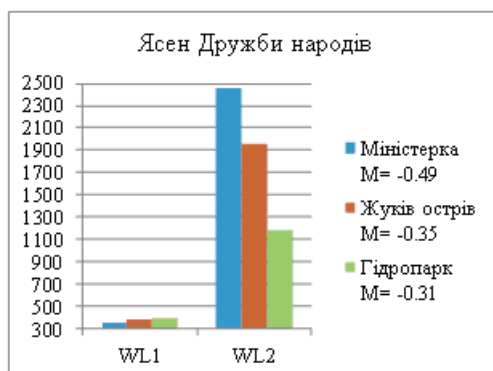


Рис.11

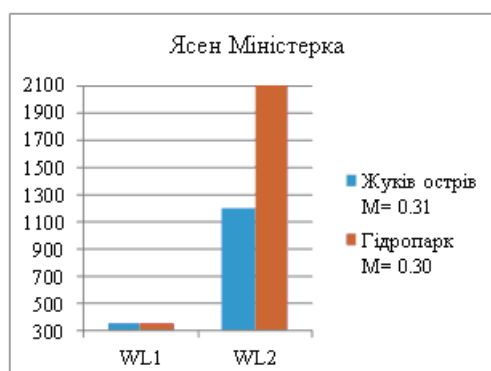


Рис.12



Рис.13

Міністерка ($M = -0.82$) і Опечень ($M = -0.88$), Гідропарк ($M = -0.62$) і Жуків острів ($M = -1.02$), які близькі до значень тополі (рис. 18, 19) показують подібність Міністерки з Опечнем ($M = -0.62$), Гідропарком ($M = -0.31$) і Жуковим островом ($M = -0.47$); Опечень з Гідропарком ($M = -0.47$), а ось на рис. 16, 17 Опечень із Жуковим островом ($M = -0.65$) і Гідропарк із Жуковим островом ($M = -0.59$) більше відрізняються.

Представлені на рис. 5–17 значення, обчислені відповідно до формули (4), й відповідні пари довжин

хвиль і зведені в спільні таблиці для тополі (таблиця 3), для ясеня (таблиця 4) і для клена (таблиця 5). У цих таблицях виділені пари ділянок: сірим кольором, на яких ростуть 3 породи тополя, ясен і клен; бузковим – 2 породи тополя і ясен; блакитним — ясен і клен.

Висновки

Результати застосування адаптивних спектральних індексів на прикладі листя тополі, ясеня та клена на відносно екологічно безпечних ділянках те-

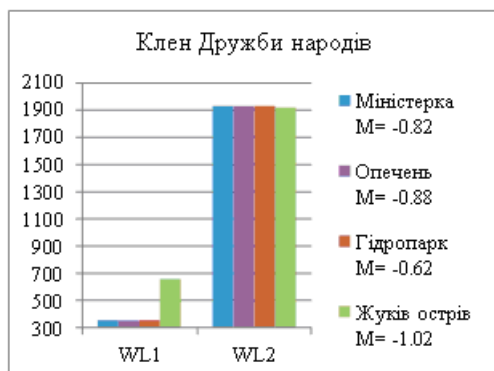


Рис.14

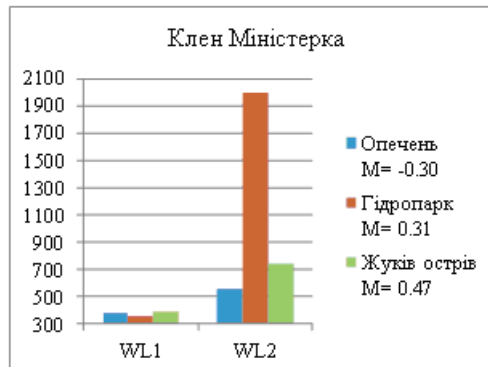


Рис.15

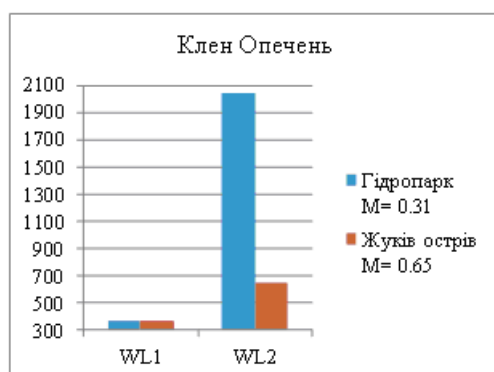


Рис.16

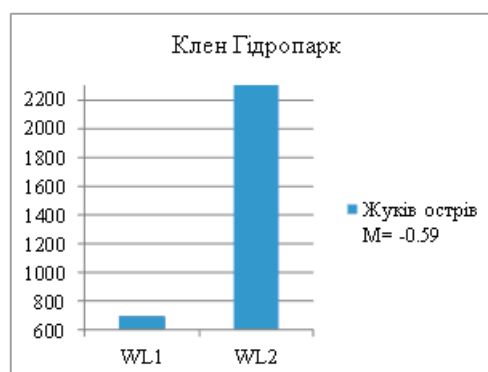


Рис.17

Таблиця 3

Тополя	Дружби Народів		Харківська		Міністерка		Опечень		Гідропарк	
	WL1	WL2	WL1	WL2	WL1	WL2	WL1	WL2	WL1	WL2
	M		M		M		M		M	
Харківська	413	803	0.17							
Міністерка	365	1923	368	1926	-0.82		-0.91			
Опечень	362	1926	361	1930	366	537	-0.95		-1.03	
Гідропарк	362	1924	359	1927	470	701	497	1896	0.22	
Саперно-Слобідська	357	407	391	511	360	1916	496	1915	354	1925

Таблиця 4

Ясен	Дружби Народів		Міністерка		Гідропарк		Жуків острів	
	WL1	WL2	WL1	WL2	WL1	WL2	WL1	WL2
	M		M		M		M	
Міністерка	369	1961						
		-0,49						
Гідропарк	401	1179	357	2464				
		-0,31		0,30				
Жуківострів	384	1962	357	1197	697	2026		
		-0,35		0,31		-0,31		
Саперно-Слобідська	362	694	371	2317	350	504	639	1782

Таблиця 5

Клен	Дружби народів		Міністерка		Опечень		Гідропарк	
	WL1	WL2	WL1	WL2	WL1	WL2	WL1	WL2
	M		M		M		M	
Міністерка	355	1927						
		-0,82						
Опечень	359	1927	375	551				
		-0,88		-0,30				
Гідропарк	360	1928	352	2000	367	2047		
		-0,62		0,31		0,31		
Жуківострів	657	1915	391	738	371	646	693	2318

риторії м. Києва з мало зміненими в результаті антропогенної діяльності компонентами (рослинність, вода, ґрунти) показали, що, тополя на Саперно-Слобідській і Дружби народів, а також клен на Дружби народів мають порівняно більші відмінності АСІ з такими ділянками, як Гідропарк, Міністерка, Опечень і Жуків острів. Цей факт не суперечить даним Центральної геофізичної обсерваторії про склад повітря в точках наземного спектрометрування. Однак, застосування АСІ до листя ясеня не показало таких результатів, які можна трактувати як незначну поглинальну здатність листя ясеня. Відмінності АСІ в екологічно подібних ділянках може свідчити про вплив інших факторів, наприклад, ґрунту.

Проведені дослідження показали принципову можливість використання адаптивних спектральних індексів для класифікації породи дерев в залежності від умов зростання при відомому місцезнаходженні (наприклад, на гіперспектральному знімку) або за визначенням умов вегетації при відомій породі дерева (наземні спектрограми в досліджуваному районі). Для цієї мети використовується інформація про довжини хвиль адаптивного спектрального індексу WL1 і WL2, а також значення модуля різниці АСІ для різних об'єктів.

Література

1. Кочубей С. Н. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. / С. Н. Кочубей, Н. И. Кобец, Т. М. Шадчина. — К.: Наукова думка, 1990. — 136 с.
2. Кузнецов С. Д. Основы баз данных. — 2-е изд. / С. Д. Кузнецов. — М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. — 484 с.
3. Праці Центральної геофізичної обсерваторії / Під ред. О. О. Косовця. — К.: Інтерпрес ЛТД, 2000–2012 рр.
4. Федоровский А. Д. Прогнозирование и поиск месторождений нефти и газа на основе спектрофотометрирования растительного покрова. / А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук, А. И. Архипов [та ін.]. // Геоинформатика. — 2010. — №3. — С. 44–47.
5. Якимчук В. Г. Дешифрування гіперспектральної космічної інформації на основі текстурних і спектральних характеристик досліджуваних об'єктів. / В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, З. В. Козлов, Л. П. Ліщенко. // Доповіді Національної академії наук. — 2008. — № 2. — С. 129–134.
6. Application: Vegetation Biomass. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: indexdatabase.de
7. Marco A. Peca. Constructing satellite-derived hyperspectral indices sensitive to canopy structure variables of a Cordilleran Cypress (*Austrocedrus chilensis*) forest. / Marco A. Peca, Alexander Brenning, Ariel Sagredo // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing — 2012. — № 74. — Р. 1–10.
8. Remote Sensing: The Quantitative Approach // Edited by P. H. Swain and S. M. Davis. — USA: McGraw-Hill, Inc., 1978. — 396 p.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ СПЕКТРОГРАММ ЛИСТЬЯ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИХ РОСТА В г. КИЕВЕ

В. Г. Якимчук, Л. П. Лищенко, К. Ю. Суханов, А. Ю. Порушкевич

Получена сравнительная характеристика оценки экологического состояния окружающей среды по спектрограмме листьев древесной растительности с помощью адаптивного спектрального индекса (АСИ). Значение информативных длин волн АСИ рассчитаны, исходя из условия максимального расстояния между средними значениями индексов для различных районов г. Киева. АСИ вычислены для спектрограмм листьев клена, тополя и ясеня.

Ключевые слова: состояние окружающей среды, спектральные индексы растительности, спектрорадиометр Fieldspec 3 FR

APPLICATION OF SPECTRAL INDICES OF THE TREE LEAVES SPECTROGRAMS FOR ASSESSING THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THEIR GROWTH IN KIEV

V. H. Yakymchuk, L. P. Lishchenko, K. Yu. Sukhanov, A. Yu. Porushkevych

The comparative description of the environmental state assessment based on the spectrogram of the leaves of the woody vegetation with adaptive spectral index (ASI) is obtained. Informative wavelengths values of ASI were calculated using the idea of the maximum distance between the average index values for the different districts of Kyiv. ASI was calculated for spectrograms of the leaves of the maple, ash tree and poplar.

Keywords: environmental conditions, spectral indices, Fieldspec 3 FR