

УДК 528.8.04:551.4

В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними EO-1 «Hyperion» для класифікації земного покриття

Надійшла до редакції 26.07.07

Наведено результати попередніх досліджень можливості використання індексів червоного краю та водних індексів для класифікації земного покриття за даними сенсора EO-1 «Hyperion». Використано космознімки території Києва та області від 14.09.2002 р., на основі яких побудовано зображення індексів REP, NDVI та HTCI, а також водних індексів LWI, NWI та SMI, які надалі використано для класифікації земного покриття. Результати досліджень показали, що класифікація рослинного покриття з використанням сукупності множин індексів дає кращий результат, ніж з використанням коефіцієнтів відбиття або окремих індексів. Це свідчить про високий потенціал використання комбінацій індексів червоного краю для моніторингу стану рослинного покриття.

ВСТУП

«Hyperion» — перший в світі гіперспектральний відеоспектрометр, встановлений на борту супутника EO-1, запущеного NASA 21 березня 2000 р. Він має 220 спектральних каналів в діапазоні $\lambda\lambda = 400\text{—}2500$ нм. Спектральна розрізненість його каналів в оптичному та ближньокочервоному (NIR) діапазонах становить 10 нм, а просторова — 30 м для всіх каналів. Ширина стандартної сцени зйомки 7.7 км, довжина — 42 км [16]. Висота його орбіти складає 705 км, як і орбіти «Landsat-7».

Із запуском на орбіту гіперспектрального супутникового сенсора стала реальною можливість отримання спектрів відбиття високої спектральної розрізненості в області червоного краю (660—780 нм) для рослинного покриття та використання цих даних для класифікації стану

рослинності на основі попиксельного обчислення індексів червоного краю. Серед цих індексів — позиція червоного краю REP (Red Edge Position); нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI та його модифікації mNDVI. Побудова зображень цих індексів за космознімком конкретної території відкриває нові можливості для розрізнення, ідентифікації, картування, моніторингу та аналізу стану рослинного покриття Землі.

Основою для методики аналізу стану рослинного покриття через дослідження індексів червоного краю його спектрів відбиття є спектральні властивості рослинного покриття в цій області, встановлені на основі даних лабораторних, польових та аерогіперспектральних зйомок.

Встановлено, що у спектральній смузі $\lambda\lambda = 670\text{—}780$ нм спектри відбиття листя здорового рослинного покриття характеризуються високими

значеннями коефіцієнтів відбиття, великою швидкістю зміни цих коефіцієнтів та різними значеннями REP для різних видів рослинності. Ця спектральна властивість рослинності створює можливість використання значення REP для розрізнення та класифікації рослинного покриву Землі за даними гіперспектральної космозйомки. Перші кроки в цьому напрямку з використанням даних відеоспектрометра ENVISAT MERIS зроблено в дослідженнях вчених Великобританії [8], Нідерландів [5] та України [2, 18]. Дослідження стану рослинного покриву лісів на основі індексів червоного краю, обчислених за даними EO-1 «Hyperion» проведено вперше в роботі [17], де встановлено зв'язок між позицією червоного краю та листовим площовим індексом для лісів Патагонії (Аргентина).

Другою важливою спектральною особливістю червоного краю для спектрів одного і того ж виду рослинності є те, що нахил спектральної кривої і позиція червоного краю змінюються під впливом змін вмісту хлорофілу в рослинах на проміжку часу від початку активного фотосинтезу і появи паростків аж до старіння рослини. Така інформація про зміни REP при зміні фенологічного стану чи стану здоров'я рослини є найбільш важливим аспектом визначення вегетаційних стресів. Вегетаційні стреси, викликані різними чинниками, які призводять до зменшення вмісту хлорофілу, проявляються у спектрах відбиття рослин зсувами REP до коротких довжин хвиль — «голубий зсув». Дослідження багатьох вчених підтвердили, що «голубий зсув» REP — це універсальний відгук на вегетаційний стрес, який може бути спричинений хворобами рослин та несприятливими екологічними умовами [1, 6, 12].

Зсув REP в спектрах відбиття рослинного покриву в довгохвильовому напрямку, так званий «червоний зсув», виникає із збільшенням вмісту хлорофілу в рослинах на різних фенологічних стадіях їхнього розвитку від початку вегетаційного росту до цвітіння. Можливість ідентифікації видів рослинних спільнот за величиною REP та зміни REP внаслідок вегетаційних стресів, викликаних геохімічними стресами, забрудненням довкілля, пошкодженням рослин шкідниками та внаслідок аварій, захворюваннями, тощо свідчать про потенційну можливість використання REP для аналізу стану рослинного

покриву Землі за даними гіперспектральної космозйомки.

Великою перевагою гіперспектральних даних є те, що вони дають можливість попиксельного обчислення REP (при наявності відповідної методики) для космознімка конкретної території і побудови REP-зображень рослинного покриву цієї території. Класифікація таких зображень дасть можливість виявляти «голубі» чи «червоні» зсуви REP, і таким чином здійснювати аналіз стану рослинного покриву Землі як у регіональному, так і в глобальному масштабі.

У роботі [8], присвяченій обробці гіперспектральних даних космозйомки відеоспектрометра MERIS, використано зв'язок випромінювання червоного та NIR-діапазону, які відповідають 8-му, 9-му та 10-му спектральним каналам MERIS, із вмістом хлорофілу в рослинному покриві та запропоновано новий вегетаційний індекс MTCI (мерісівський наземний хлорофільний індекс). Встановлено, що індекс MTCI чутливіший, ніж індекс REP, до змін хлорофілу при високих рівнях вмісту хлорофілу в рослинному покриві. Використовувались наземні польові спектрорадіометричні дані та дані відеоспектрометра MERIS для тестових ділянок на території Великобританії. Показано можливість побудови REP- та MTCI-зображень конкретної території на прикладі космознімка ENVISAT MERIS та використання цих зображень для класифікації рослинного покриву Землі. Ми пропонуємо новий вегетаційний індекс для даних «Hyperion», який ми назвали НТСІ, і розглядаємо нижче можливість його використання при дослідженні рослинного покриву.

Відзначимо, що подібні дослідження проведені в ЦАКДЗ [2, 18], де вперше дані космознімки ENVISAT MERIS використано для класифікації наземного покриву Карпат. Таким чином, дані гіперспектральних супутникових сенсорів із високою спектральною розрізненістю в області червоного краю забезпечують величезний потенціал для розрізнення, ідентифікації, картування, моніторингу та аналізу стану рослинного покриву Землі з використанням позиції червоного краю та побудови REP-зображень рослинного покриву для заданих моментів часу протягом року, від появи перших паростків навесні до відмирання восени. Такі масиви багаточасових REP-зображень для однієї і тієї ж території

створять основу для моніторингу та аналізу стану рослинного покриву і дозволять оператив-но визначати ділянки вегетаційного стресу і зони ураження лісів шкідниками (наприклад, сосновим шовкопрядом та кореневою губкою [1, 3, 7, 15]), у місцях екологічних катастроф, небезпечних для життя людини.

Поряд з вегетаційними індексами червоного краю, які відображають стан рослинного покриву, все більшого використання набувають так звані водні індекси, які характеризують зволоженість земного покриву, вміст вологи в верхньому шарі ґрунту та вміст вологи у рослинному покриві [4, 9, 13, 14, 19—21]. Дані сенсора «Hyperion» дозволяють попіксельно обчислювати значення водних індексів і мати принципово нові характеристики земного покриву для оцінки його екологічного стану [10]. Зокрема, за даними «Hyperion» можна обчислювати такі водні індекси [10]:

- індекс LWI зволоженості рослинного покриву (the liquid water index), що використовує різницю спектрального відбиття на довжинах хвиль λ 1100 та 2200 нм,
- індекс SMI вологості ґрунту (the soil moisture index), який обчислюється як відношення середнього спектрального відбиття в діапазоні $\lambda\lambda = 1550—1750$ нм до середнього відбиття в діапазоні $\lambda\lambda = 2080—2350$ нм.

Ми запропонували індекс NWI (the normalized water index) для оцінки зволоженості земного покриву [4], який у роботі [10] використано для ідентифікації снігового покриву і названо NDSI (the normalized difference snow index). Але нами встановлено, що 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 [4].

ПОБУДОВА ЗОБРАЖЕНЬ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ЧЕРВОНОГО КРАЮ ЗА ДАНИМИ СЕНСОРА EO-1 «HYPERION»

Гіперспектральні зображення, як і багатоканальні, можуть бути піддані спектральним перетворенням, які породжують нові множини зображень. Такі трансформовані зображення мо-

жуть зробити помітними особливості (характеристики), які погано розпізнаються на оригінальному зображенні, чи підкреслити суттєвий інформаційний зміст зображення, використовуючи дані меншої кількості спектральних каналів, які належать не всій спектральній області, а лише деякій її підмножині. Для спектрів відбиття рослинного покриву такою інформаційною підмножиною є область червоного краю, для якої наведемо формули деяких вегетаційних індексів з використанням даних сенсора EO-1 «Hyperion».

Обчислення REP. За означенням, REP — довжина хвилі із інтервалу 680—760 нм, на якій швидкість зміни спектру відбиття рослинності досягає максимуму. Вперше визначення індексів червоного краю за даними EO-1 «Hyperion» здійснено в роботі [17]. Згідно з методом 4-точкової лінійної інтерполяції REP EO-1 «Hyperion» визначається за формулами [17]

$$REP = 701.55 + 40.7 \frac{\bar{R} - R(701.55)}{R(742.25) - R(701.55)}, \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R(671.02) + R(782.95)}{2},$$

де $R(\lambda)$ — коефіцієнт відбиття на довжині хвилі λ [10].

Обчислення HTCI. Одним із нових вегетаційних індексів, які використовують значення коефіцієнтів відбиття на довжинах хвиль із області червоного краю, є індекс HTCI (the Hyperion Terrestrial Chlorophyll Index) — аналог наземного хлорофільного індекса MTCI (the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index). Індекс HTCI — це відношення різниці коефіцієнтів відбиття в 40-му і 36-му каналах до різниці коефіцієнтів відбиття в 36-му і 33-му каналах сенсора EO-1 «Hyperion»:

$$HTCI = \frac{R(752.43) - R(711.72)}{R(711.72) - R(681.21)}. \quad (2)$$

В роботі [8] показано, що у випадку високих значень вмісту хлорофілу в рослинах MTCI більш чутливий до зміни хлорофілу, ніж REP, тобто при високих значеннях вмісту хлорофілу малим змінам значень REP відповідають значні зміни значень MTCI.

Обчислення NDVI. Розпізнавання стану рослинного покриву можна здійснювати за допомо-

гою нормалізованого різницевого вегетаційного індекса NDVI. Для даних EO-1 «Hyperion» цей індекс можна обчислювати за формулою [10]

$$\text{NDVI} = \frac{R(864.35) - R(671.02)}{R(864.35) + R(671.02)}. \quad (3)$$

Обчислення mNDVI. В роботі [2] для картування земного покриву за даними ENVISAT MERIS використано модифікований нормалізований вегетаційний індекс mNDVI, який, на відміну від NDVI, використовує значення коефіцієнтів відбиття в двох каналах із області червоного краю. Для даних EO-1 «Hyperion» цей індекс можна обчислити за формулою

$$\text{mNDVI} = \frac{R(752.43) - R(711.72)}{R(752.43) + R(711.72)}. \quad (4)$$

Обчислюючи значення індексів (1)–(4) для кожного пікселя космоснімка EO-1 «Hyperion» конкретної території, можна сформулювати нові REP-, HTCI-, NDVI- та mNDVI-зображення, які можна використати для аналізу та картування наземного покриву.

Обчислення LWI. Формула розрахунку індексу зволоженості LWI будується аналогічно вегетаційному індексові NDVI. Але замість каналів у червоній та ближній інфрачервоній зонах спектру використовується відбиття у каналах з довжиною хвилі приблизно 1100 та 2200 нм. Для даних EO-1 «Hyperion» формула для розрахунку LWI має вигляд

$$\text{LWI} = \frac{R(1104.18) - R(2203.83)}{R(1104.18) + R(2203.83)}. \quad (5)$$

Обчислення SMI. Для обчислення індексу вологості ґрунту SMI необхідно визначити середнє відбиття в діапазонах 1550–1750 нм та 2080–2350 нм. Для даних EO-1 «Hyperion» це означає усереднення значень R у 20 та 19 каналах відповідно. Значення індексу SMI обчислюється як відношення отриманих середніх значень [10]:

$$\text{SMI} = \frac{R(1558.12 \dots 1749.79)}{R(2082.75 \dots 2245.11)}. \quad (6)$$

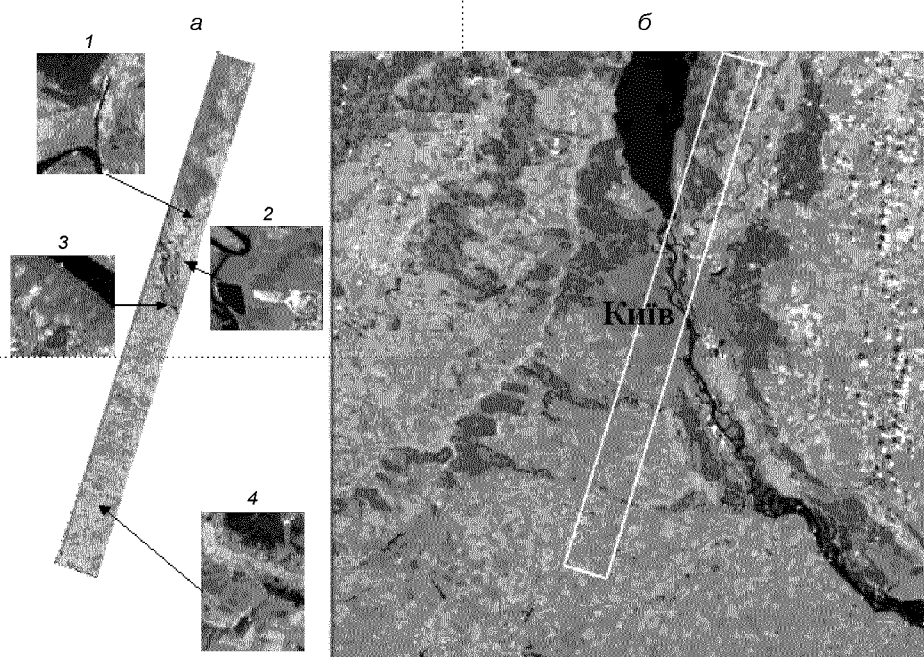


Рис. 1. Синтезоване зображення EO-1 «Hyperion» (14.09.2002 р.) у межах Київського регіону (синтез каналів 20, 30 та 40) та досліджувані фрагменти (а) і синтезоване зображення «Landsat» ETM (14.09.2001 р.) (синтез каналів 2, 4, 5) (б), де показано розташування знімка «Hyperion»

Мінімальні, максимальні та середні значення індексів червоного краю і водних індексів за даними EO-1 «Hyperion» (14.09.2002 р.) та «Landsat-7» ETM (14.09.2001 р.) для різних класів земного покриття

Номер п/п	Номер ділянки	Клас земного покриття	EO-1 «Hyperion»						«Landsat-7» ETM		
			NDVI	REP	HTCI	LWI	SMI	NWI	NDVI	SMI	NWI
1	1	Сосновий ліс	0.417	723.58	2.33	0.881	4.29	0.762	0.260	4.07	0.715
			0.504	725.91	3.28	0.954	5.87	0.819	0.471	5.92	0.799
			0.466	724.73	2.85	0.914	4.97	0.796	0.359	5.03	0.768
2	1	Водна поверхня	0.043	711.80	-27.66	0.828	3.70	0.826	-0.267	2.26	0.887
			0.167	723.88	8.38	0.974	6.69	0.953	-0.129	4.01	0.943
			0.069	718.27	2.82	0.908	4.94	0.919	-0.196	3.24	0.907
3	1	Луки	0.253	723.90	2.62	0.648	2.40	0.530	-0.00	3.36	0.523
			0.418	727.11	5.50	0.768	3.27	0.685	0.288	4.49	0.691
			0.348	725.53	3.38	0.710	2.77	0.604	0.136	3.92	0.604
4	1	Луки заболочені	0.380	722.85	1.56	0.775	3.47	0.621	0.100	3.72	0.565
			0.497	725.00	2.23	0.857	4.16	0.667	0.256	4.72	0.633
			0.430	724.00	1.92	0.815	3.87	0.644	0.202	4.21	0.600
5	2	Відкритий піщаний ґрунт	0.119	724.15	-139.57	0.610	2.15	0.597	-0.101	3.04	0.623
			0.203	733.96	25.14	0.689	2.47	0.740	-0.002	3.42	0.660
			0.178	730.35	-22.60	0.634	2.22	0.622	-0.081	3.15	0.647
6	2	Міські агломерації (новобудови, Троещина)	0.124	725.83	-213.25	0.625	2.28	0.521	-0.139	2.87	0.529
			0.325	732.60	71.61	0.779	3.22	0.810	0.242	4.27	0.830
			0.239	728.85	1.25	0.709	2.61	0.685	0.048	3.52	0.678
7	2	Луки та чагарники на піщаних ґрунтах	0.484	721.90	1.41	0.826	3.93	0.585	0.296	4.85	0.534
			0.635	724.41	2.15	0.899	5.09	0.761	0.584	6.81	0.823
			0.592	723.12	1.9	0.868	4.64	0.625	0.454	5.54	0.599
8	3	Листяні деревостани у парковій зоні	0.520	726.01	2.91	0.899	4.95	0.689	0.322	4.75	0.607
			0.587	728.36	4.57	0.954	5.77	0.763	0.633	6.79	0.739
			0.559	727.21	3.78	0.921	5.35	0.735	0.486	5.67	0.663
9	3	Трав'яний покрив, стадіон «Динамо»	0.346	725.88	2.87	0.887	4.71	0.656	0.367	5.05	0.566
			0.634	726.05	4.88	0.911	5.02	0.669	0.655	7.13	0.690
			0.486	725.94	3.80	0.896	4.83	0.664	0.559	5.96	0.606
10	3	Міські агломерації (стара забудова у Печерському районі)	0.108	724.28	-36.26	0.578	2.08	0.730	-0.121	3.03	0.678
			0.420	727.95	18.64	0.801	3.19	0.813	0.280	4.13	0.787
			0.242	726.36	3.31	0.724	2.56	0.769	0.044	3.39	0.730
11	3	Водна поверхня, р. Дніпро	-0.056	717.73	-80.32	0.790	3.00	0.950	-0.272	2.34	0.880
			0.182	743.90	4.33	0.947	6.25	0.963	-0.134	4.09	0.949
			-0.007	726.72	-4.44	0.889	4.20	0.957	-0.211	3.18	0.909
12	4	Сосновий ліс	0.491	723.54	2.34	0.894	4.55	0.773	0.345	4.44	0.733
			0.528	725.75	2.97	0.936	5.43	0.803	0.449	6.28	0.785
			0.507	724.30	2.62	0.915	4.97	0.791	0.388	5.22	0.761
13	4	Листяний ліс	0.563	724.39	2.21	0.881	4.66	0.667	0.412	4.38	0.578
			0.636	726.62	3.66	0.941	6.37	0.783	0.612	7.40	0.765
			0.592	725.53	2.88	0.907	5.35	0.710	0.540	6.09	0.655
14	4	Відкритий ґрунт (стерня)	0.359	722.59	1.70	0.748	3.27	0.568	0.152	4.16	0.540
			0.384	724.30	2.11	0.775	3.46	0.597	0.227	4.90	0.596
			0.376	723.26	1.84	0.764	3.37	0.581	0.188	4.39	0.572
15	4	Водна поверхня, ставок	0.046	710.27	0.90	0.871	4.22	0.907	-0.452	2.61	0.807
			0.088	724.22	3.04	0.924	5.59	0.933	0.077	5.17	0.922
			0.069	714.14	1.54	0.911	4.74	0.927	-0.216	3.45	0.898
16	4	Луки заболочені	0.562	723.08	1.82	0.876	4.83	0.612	0.341	5.07	0.524
			0.657	726.68	3.16	0.932	5.74	0.687	0.522	6.74	0.652
			0.620	725.62	2.78	0.913	5.21	0.648	0.462	5.76	0.598

Розрахунок індексу SMI за даними «Landsat 7» ETM+ базується на каналах 5 та 7, що буде використано для зіставлення значень SMI за даними EO-1 «Hyperion» та «Landsat 7» ETM+ для окремих типів земного покриву.

Обчислення NWI. Обчислення запропонованого нами водного індексу NWI для оцінки зволоженості земного покриву, який в роботі [10] названо індексом NDSI, виконуються аналогічно NDVI та LWI з використанням відбиття у зеленій та середній інфрачервоній зонах спектру. Для даних EO-1 «Hyperion» формула набуває вигляду

$$NWI = \frac{R(559.09) - R(1648.91)}{R(559.09) + R(1648.91)}. \quad (7)$$

За даними попиксельного обчислення водних індексів за формулами (5)—(7) будуються відповідні зображення.

ДЖЕРЕЛО ДАНИХ ТА МЕТОДИ

У цьому дослідженні використано зображення EO-1 «Hyperion» від 14 вересня 2002 р. (EO1H1810252002244110PZ). Дані рівня 1R — радіометрично кориговані. Конвертовані до формату ERDAS Imagine за допомогою програми ENVI. На рис. 1 наведено зображення досліджуваної території Києва та області. Ширина сцени приблизно 7.5 км, довжина — 94 км. Досліджувана територія розташована вздовж смуги, центральна лінія якої на півдні починається з точки з координатами 30°21'35" с. д. та 50°01'05" п. ш. і закінчується на півночі в точці з координатами 30°43'00" с. д. та 50°50'20" п. ш.

В межах сцени для дослідження виділено декілька ділянок, зокрема ділянки 1, 2, 3 та 4 (рис. 1). Це дозволило виконати аналіз діапазонів змін вегетаційних індексів за даними «Hyperion» для наступних різновидів рослинного покриву та земної поверхні. В межах ділянки 1 оцінено відбивні характеристики соснового лісу, луків, водної поверхні р. Десна. Друга ділянка включає намивні піщані утворення, сучасні забудови району Троещина, заплавні луки та заболочені ділянки у заплаві р. Десни та водну поверхню р. Десна. В межах третьої ділянки досліджувались відбивні характеристики листяних порід дерев в межах паркової зони (район Маріїнського парку), а також міські агломерації

центральної частини Києва. У межах четвертої ділянки досліджувались відбивні характеристики сільськогосподарських угідь, масивів соснового та листяного лісу та заболочених ділянок вздовж р. Стугна біля с. Погреби Васильківського району. Відповідні зображення вегетаційних індексів червоного краю та водних індексів наведено на рис. 2—5, що дозволило визначити величини цих індексів для різних видів земного покриву (таблиця).

РЕЗУЛЬТАТИ

У таблиці показано діапазони змін індексів NDVI, REP, НТСІ, LWI, SMI і NWI для різних земних покривів у межах досліджуваних ділянок. Зауважимо, що модифікований індекс mNDVI (4) на дослідних ділянках має просторовий розподіл, подібний до розподілу NDVI, але з вужчим діапазоном значень, і тому в подальших дослідженнях нами не використовувався. Отримані дані свідчать про суттєві відмінності значень індексів для різних видів земного покриву, що створює можливості для їхньої класифікації.

Індекси NDVI, SMI та NWI можна визначити також за даними «Landsat-7» ETM+ і зіставити їх з даними EO-1 «Hyperion». У таблиці наведено значення індексів NDVI, SMI, NWI за даними «Landsat-7» (14.09.2001 р.) для однакових ділянок земного покриву, що використовувались для зіставлення з відповідними індексами для даних EO-1 «Hyperion». Зіставлення значень індексів показало незначні розбіжності. Значення NDVI за даними «Landsat» менші, але загальні закономірності і тенденції зміни цього індексу зберігаються. Певні розбіжності є у значеннях SMI і NWI, та вони не носять системного характеру і загалом зберігають загальні закономірності. Найближчими за значеннями та тенденціями змін виявилися індекси NWI, які майже не відрізнялись за даними EO-1 «Hyperion» та «Landsat-7» ETM+. Різниця значень NWI настільки незначна, що її можна пояснити різним часом отримання даних. Взагалі індекс NWI за нашими оцінками показує найбільш стійкі та логічні значення щодо оцінки зволоженості різних видів земного покриву при використанні різних даних супутникової зйомки.