



ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР НА ОСНОВІ ДАНИХ IRS-1D LISS-III

Обосновано применение вегетационных индексов (NDVI, WdVI, PVI₁), рассчитанных на основе данных космических съемок. Проанализирована динамика вегетационных индексов на протяжении весенне-летнего периода для сельскохозяйственных культур Центральной Лесостепи.

The application of vegetation indices (NDVI, WdVI, PVI₁), derived from time series satellite data, is considered in the paper. The dynamics of the indices for field crops areas during spring-summer period in Central Forest-Steppe zone of Ukraine has been analyzed.

Вступ. Розроблення та впровадження системи моніторингу природних ресурсів передбачає необхідність використання аерокосмічних засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Їх роль полягає у забезпеченні об'єктивної інформації про екологічні умови, властивості, стан та просторову структуру ландшафтів, у т. ч. сільськогосподарських, або агроландшафтів.

Об'єктивна інформація про стан культур у визначальні періоди їх росту і розвитку необхідна для оптимального управління їх продукційним процесом та забезпечення фахівців прогнозними даними. Космічні системи набули широкого застосування в моніторингу агроресурсів у багатьох країнах світу. Задачі дистанційного моніторингу агроресурсів постійно розширюються з появою нових серій супутників та сенсорів.

Широкого використання у дослідженнях агроресурсів набули дані, одержані за допомогою мульти-спектральних сенсорів із супутників NOAA/AVHRR, Landsat 5 TM, Landsat 7/ETM+, Terra/Modis, Terra/Aster, SPOT-4, SPOT-5, IRS-1D, IRS-P6, RapidEye [5, 6, 20]. Зростають масштаби використання даних, одержаних на основі гіперспектральних сенсорів, що теж розширює спектр задач супутникового радіолокаційного моніторингу в сільському господарстві [3, 10, 14].

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми. Використання даних ДЗЗ в аграрному секторі економіки та здійснення агромоніторингу дає можливість розробити інформаційну базу для прогнозування стану та розвитку галузі рослинництва, насамперед для визначення посівних площ, стану культур, кількісних і якісних змін посівів тощо. Разом з тим ефективно використання аерокосмічних даних також обов'язково передбачає застосування конкретних даних про характер об'єктів, одержаних наземними методами досліджень.

До основних показників, що характеризують стан культур і які визначають у ході наземних обстежень, відносять: проективне покриття (ПП), висоту рослин, густоту посівів, надземну фітомасу рослин, ступінь пошкодження шкідниками та ураженість хворобами, які у свою чергу корелюються зі спектральними характеристиками посівів [1, 2, 7, 8, 18]. Оцінюються також параметри рослинності за даними вимірювання характеристик відбиття [4, 6, 9].

Для визначення параметрів рослинності широ-

ко застосовують алгоритми, які ґрунтуються на регресійних залежностях між біометричними показниками культур у певні фази росту і розвитку та коефіцієнтом відбиття електромагнітної енергії. За спектральні параметри відбиття обирають вегетаційні індекси (ВІ). Так, особливості формування спектрального розподілу інтенсивності відбитого від рослинного покриву світла у видимому – середньому інфрачервоному діапазоні – та вплив на нього внутрішніх і зовнішніх факторів свідчать про можливість використання характеристик спектрів відбиття як інформативної основи при розробленні моделей визначення фітометричних показників рослинності, кількості хлорофілу і т. д. [6]. Тому виявлення функціональних залежностей між характеристиками сільськогосподарських культур і даними дистанційних спектральних вимірювань, заснованих на одержанні похідних зображень і визначенні вегетаційних індексів відбиття, і є завданням даного дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Використання даних ДЗЗ при вивченні агроресурсів суттєво залежить від часу одержання знімків у мульти-спектральному діапазоні, оскільки це пов'язано із настанням відповідних фаз росту і розвитку культур та зміною спектральних характеристик посівів протягом вегетаційного періоду. Для вирішення поставлених у дослідженні завдань використовувались космічні знімки із супутника IRS-1D LISS-III з просторовим розрізненням 23 м за весняно-літній період 2008 р. та матеріали наземних вимірювань, що проводились одночасно з космічними зніманнями. Місце досліджень – Маньківська державна сортовипробувальна станція в Черкаській області.

Для попереднього оброблення знімків використано Erdas Imagine V.9.3, трансформування зображень і тематичного оброблення – Idrisi Taiga, статистичного опрацювання даних – програмне забезпечення STATISTICA 6. Порівняльний аналіз вегетаційних індексів здійснено в ході побудови єдиної шкали. Для порівняння та аналізу розрахункових значень ВІ за різночасовими знімками проведено перетворення "сирих значень" (digital numbers, DN) у фізичні одиниці з використанням характеристик, наданих у файлі метаданих.

При дослідженні використано три ВІ – індекс нормалізованої різниці (NDVI) та два індекси, що являють собою групу перпендикулярних індексів, – індекс зваженої різниці (WdVI) та перпендикулярний вегетаційний індекс (PVI₁). Вибір індексів



диктувався здатністю NDVI характеризувати густоту рослинного покриву, який давав змогу оцінювати схожість культур та обґрунтовувати продуктивність угідь, і властивостями перпендикулярних індексів характеризувати вплив яскравості ґрунту.

Одержання перпендикулярних індексів передбачає знаходження ортогональної відстані від умовної лінії, що являє собою площину голого ґрунту, до точки, в якій розвивається рослинність. При побудові регресійної залежності між відбиттям у червоній та інфрачервоній області спектра значення відбиття для ґрунту, одержані мульти-спектральним сканером, утворюють пряму лінію. "Точки рослинності" лежать поза лінією ґрунту – перпендикулярно до неї. Рівняння залежності має вигляд: $NIR = g \cdot RED + \alpha$, де α – перетин лінії ґрунту з віссю NIR (у даному випадку це незалежна варіююча); g – нахил лінії ґрунту. Ці два параметри залежать від хімічного та мінералогічного складу ґрунту, вологості, вмісту органічної речовини.

Вегетаційні індекси визначались за формулами

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}); \quad (1)$$

$$WDVI = \rho_{NIR} - g \cdot \rho_{RED}; \quad (2)$$

$$PVI_1 = \frac{g \cdot NIR - RED + \alpha}{\sqrt{g^2 + 1}}, \quad (3)$$

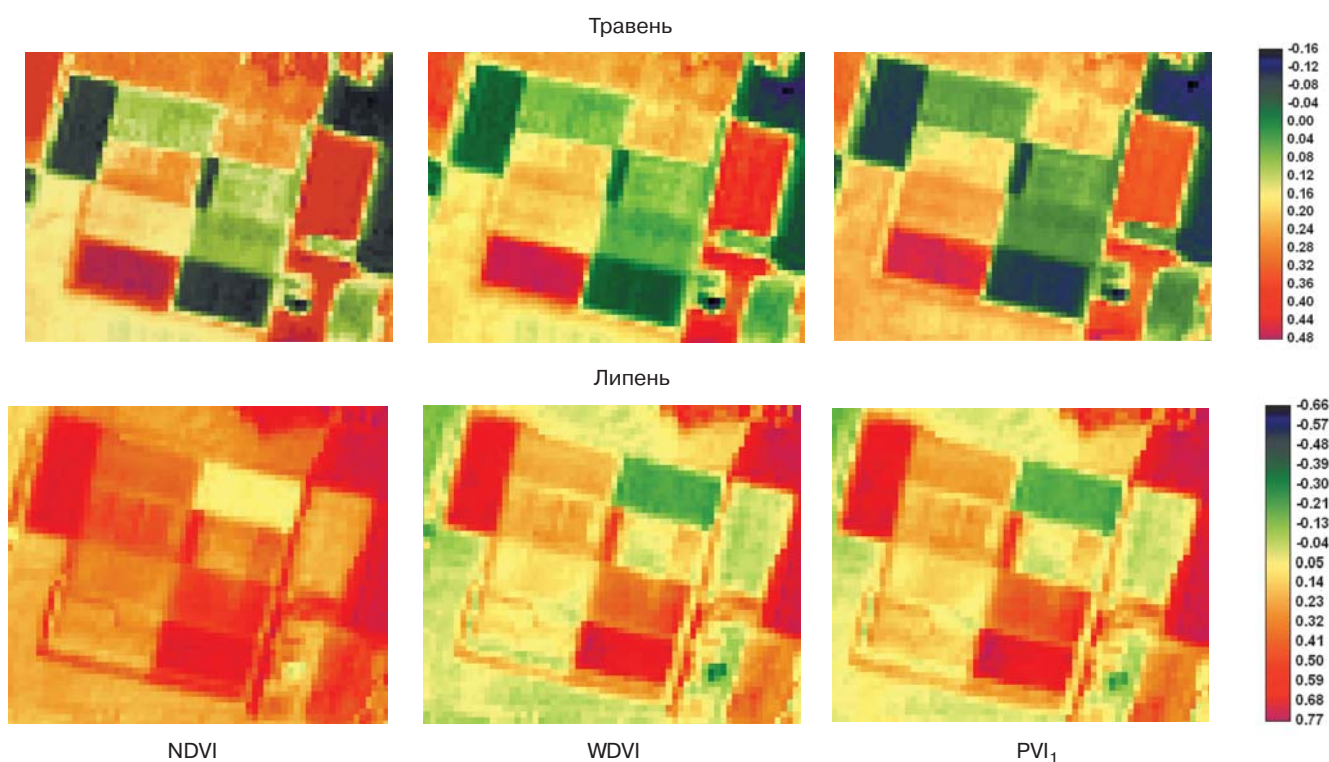
де ρ_{NIR} – коефіцієнт яскравості у ближньому інфрачервоному діапазоні; ρ_{RED} – те саме у червоному діапазоні; g – нахил лінії ґрунту; α – перетин лінії ґрунту; NIR – значення спектрального відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні; RED – те саме у видимому червоному діапазоні.

Індекс нормалізованої різниці (NDVI) – один з

найпоширеніших та найбільш обґрунтованих вегетаційних індексів [12, 17]. Функціонально він еквівалентний простому співвідношенню відбитого електромагнітного випромінювання у червоному діапазоні до випромінювання в ближньому інфрачервоному діапазоні. Зазвичай саме така особливість цього індексу забезпечує його кореляцію з накопиченням біомаси рослин та індексом листової поверхні (LAI). Завдяки використанню при розрахунках NDVI нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відбиття забезпечується зниження різних форм мультиплікативного шуму (різниці в освітленні знімка, хмарності, серпанку, поглинання радіації атмосферою), наявного у спектральних каналах різночасових знімків. У проведеному дослідженні враховано особливість NDVI, пов'язану з помірною чутливістю до зміни ґрунтового фону (за винятком випадків, коли густота рослинного покриття була нижчою за 30 %). Для того щоб зменшити вплив зрідженості посівів та виключити вплив чинника яскравості ґрунту, використано перпендикулярні індекси.

Застосування групи вегетаційних індексів, що базуються на перпендикулярному індексі, у випадку, коли рослинність зріджена і пікселі включають дані про вегетуючу рослинність та ґрунтовий фон, описано в попередніх дослідженнях [6, 11, 13]. Вегетаційний індекс зваженої різниці (WDVI) включає коефіцієнти яскравості у ближньому інфрачервоному діапазоні, у червоному діапазоні та нахил лінії ґрунту. Він набуває різних значень. Для розрахунку WDVI нами створено маски вегетуючої рослинності й ґрунту і визначено нахил лінії ґрунту.

Для визначення перпендикулярного вегетаційного індексу (PVI) використано перпендикулярну відстань до лінії ґрунту (як індикатор розвиненості



Мал. 1. Зображення вегетаційних індексів у весняно-літній період накопичення вегетативної біомаси



рослин) та введено індекс ґрунтової лінії [16, 19]. Перпендикулярні індекси – це окремий клас спектральних індексів лінійних комбінацій n спектральних смуг в n -вимірному просторі.

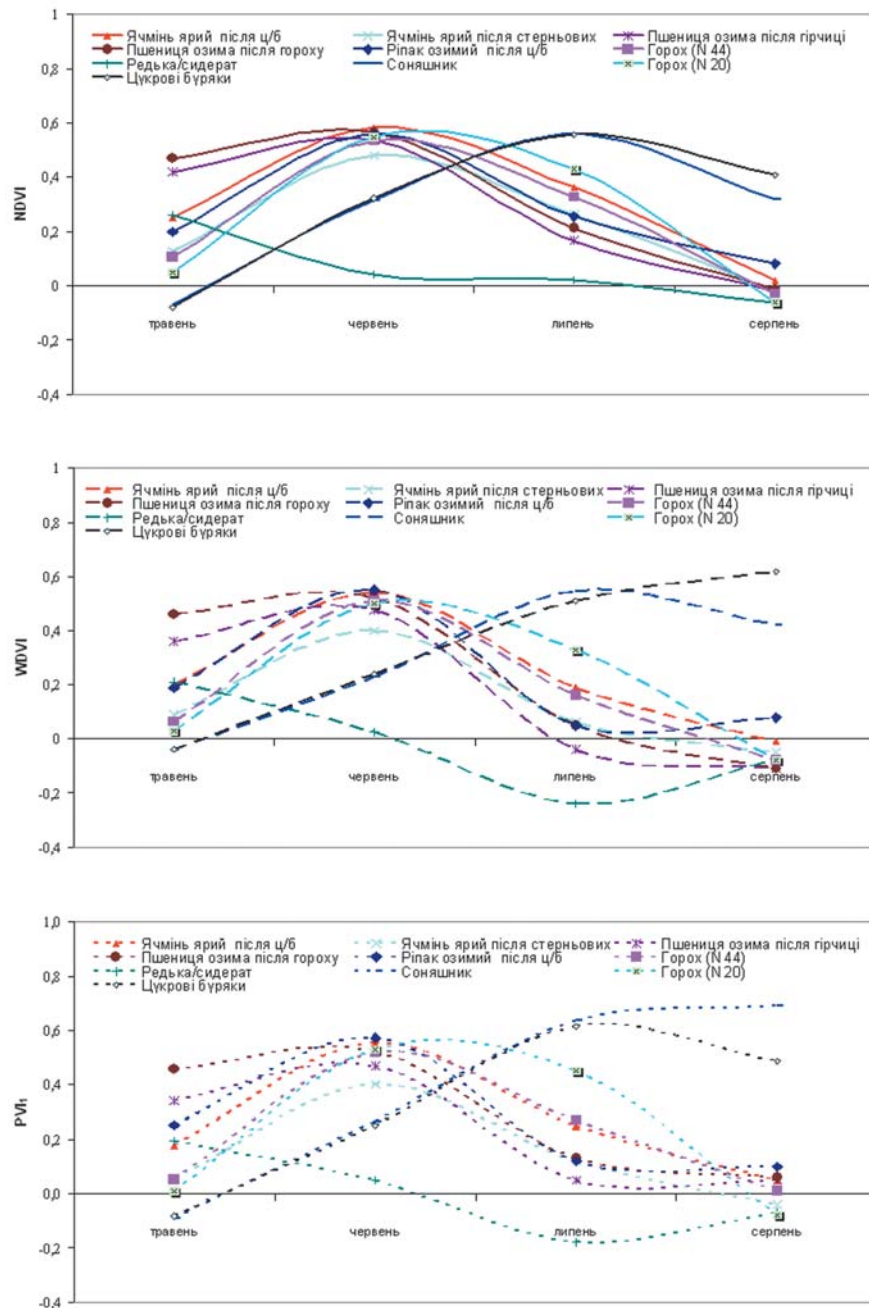
Використаний у дослідженні перпендикулярний індекс PVI_1 першими запровадили Perry і Lautenschlager [15], які вважали, що формула визначення перпендикулярного індексу PVI не враховує розподіл між пікселями, які знаходяться зліва або справа від лінії ґрунту. Так, обчислення індексу PVI_1 передбачає присвоєння негативних значень тим пікселям, що знаходяться ліворуч від лінії ґрунту.

Результати визначення BI під час дослідження відображено на мал. 1. Так, у другій декаді травня 2008 р. значення цих індексів для вегетуючих культур варіювались від 0,05 до 0,47 для $NDVI$, 0,03-0,46 – для $WDVI$, 0,01-0,46 – для PVI_1 . На зображеннях у травні поля озимої пшениці мають червоний колір, гороху – від світло-зеленого ($NDVI$) до зеленого (PVI_1), соняшнику і цукрових буряків – темно-зелений, ріпаку – від світло-жовтого ($NDVI$) до оранжевого (PVI_1).

Найвищі значення індексів у травні відмічено для озимої пшениці (див. мал. 2). У червні вони були максимальними для озимих і ярих зернових культур. Простежувалась залежність величин BI озимої пшениці від попередника. Так, в озимій пшениці після гороху значення індексів були суттєво вищими у порівнянні з попередником гірчицею. Максимальні значення BI для зернових культур відмічено у червні (завершення колосіння – початок цвітіння в озимих культур та кінець виходу в трубку – початок колосіння у ярих). Для цукрових буряків значення $NDVI$ характеризувались максимальним зростанням у період інтенсивного росту листя і коренеплоду, тоді як у період утворення цукру в листках та відкладання його в коренеплодах спостерігалось зниження індексу $NDVI$. Індекс зваженої різниці продовжував зростати у серпні за рахунок високої густоти посівів. Перпендикулярний індекс PVI_1 для посівів цукрових буряків знижувався, що може бути пов'язано з відмиранням частини листків нижнього ярусу.

Для соняшнику відмічено зростання величини $NDVI$ та $WDVI$ до періоду утворення кошика й індексу PVI_1 – до періоду цвітіння і дозрівання кошиків за рахунок зниження поглинання в червоному діапазоні при зменшенні площі фотосинтетичної листової поверхні та високій біомасі культур.

Для визначення суттєвої різниці між значеннями

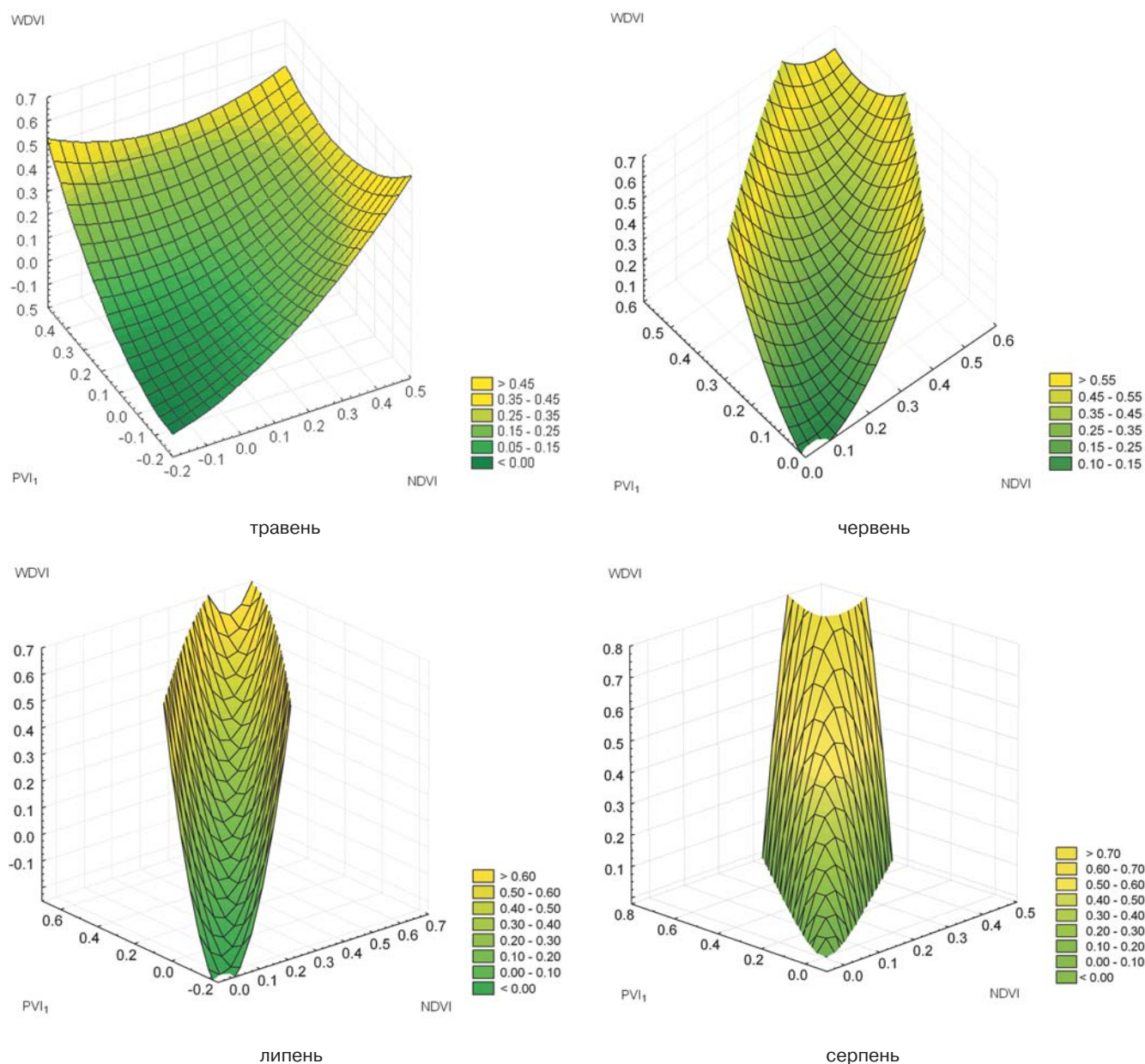


Мал. 2. Динаміка вегетаційних індексів для сільськогосподарських культур протягом травня-серпня

BI за періодами зніманий нами використано t -критерій Стьюдента. Так, при $\alpha=0,05$ суттєвими були: 1) для зернових культур – різниця між $NDVI$ - $WDVI$ у травні, червні й липні, для соняшнику і цукрових буряків – лише у червні в період інтенсивного формування вегетативної біомаси; 2) для всіх культур – різниця між $NDVI$ - PVI_1 упродовж усього періоду досліджень; 3) між PVI_1 та $WDVI$ – лише у липні для зернових, соняшнику і цукрових буряків.

Отже, результати досліджень показали, що кожний з розглянутих BI специфічно характеризує стан культур у відповідну фазу.

Для побудови тривимірної моделі поверхні за x , y , z взято значення досліджуваних індексів (мал. 3).



Мал. 3. Варіювання значень вегетаційних індексів залежно від періодів знімань

Наприклад, інтервал значень для ВІ у травні був в одному діапазоні. У червні цей діапазон зменшився від 0,32 до 0,52 для NDVI та 0,24-0,56 – для інших індексів. Діапазон значень ВІ у липні розширювався за рахунок зростання співвідношення між індексом цукрових буряків і соняшнику та індексу зернових культур. Найбільший розкид значень був характерним для PVI₁ у липні й серпні. Тому даний індекс виявляє найвищу ефективність у визначенні стану зернових культур у період дозрівання зернових та забезпечує відносну здатність культур до накопичення надземної біомаси.

Враховуючи особливості кожного із досліджуваних вегетаційних індексів, доцільно відмітити, що величина NDVI корелюється з кількістю фотосинтетичної біомаси, тому цей індекс неефективно використовувати у періоди сходів культур і дозрівання та за умов зрідженої рослинності. Нами ви-

явлено, що для NDVI у травні характерний позитивний кореляційний зв'язок з величиною урожайності зернових і зернобобових культур ($r_{xy}=0,87$), тоді як для інших досліджуваних ВІ у даний період зафіксовано слабший зв'язок – 0,71-0,83.

Аналіз величини проективного покриття з урахуванням наземних даних та значень вегетаційних індексів у відповідні періоди знімань показав, що високий позитивний кореляційний зв'язок між ПП та ВІ відмічено у травні (0,87-0,92). У червні кореляція між ПП і величинами вегетаційних індексів зростала до 0,97 з перевагою NDVI. У період дозрівання зерна величина NDVI характеризувала загальне накопичення біомаси для зернових культур, тоді як значення індексів WDI та PVI₁ у даний період мали тенденцію до стрімкого зниження ($\leq 0,10$), що властиво для періодів молочно-воскової та повної стиглості зерна.



Висновки. У дослідженні проаналізовано результати визначень вегетаційних індексів за серією космічних знімків IRS-1D LISS-III протягом весняно-літнього періоду для культур типової сівозміни центрального правобережного Лісостепу. Встановлено особливості ефективного використання досліджуваних ВІ.

Обґрунтовано закономірності динаміки вегетаційних індексів за весняно-літній період для культур сівозміни. Визначено, що для прогнозного оцінювання врожайності доцільно використовувати величину NDVI, визначену для ярих та озимих зернових культур у періоди "3-й листок – кушення" та "кінець кушення – вихід у трубку" відповідно.

Встановлено, що досліджувані вегетаційні індекси характеризувались однаковим діапазоном значень у травні. Звуження діапазону значень ВІ фіксувалось у період інтенсивного наростання фотосинтетичної біомаси рослин у червні. Діапазон значень ВІ у липні розширювався за рахунок зростання співвідношення між ВІ технічних та олійних культур і зернових. Найбільший розкид значень у липні й серпні був характерним для PVI₁. Тому цей індекс більш ефективний при визначенні стану зернових культур у період дозрівання зерна та забезпечує відносну здатність культур до накопичення надземної біомаси.

Література

1. *Бабич, С.М.* Методичні аспекти аналітичного опрацювання інформації при аерокосмічному моніторингу посівів [Текст] / С.М. Бабич // Системні дослідження та моделювання в землеробстві. – К.: Нива, 1998. – 410 с.
2. *Жолобак, Г.М.* Завірково-калібрувальні дані в задачах природокористування, пов'язаних із сільськогосподарськими культурами [Текст] / Г.М. Жолобак, О.І. Сахацький // Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування; за ред. В.І. Лялька і М.О. Попова. – К.: Наук. думка, 2006. – С. 262-268.
3. *Кантемиров, Ю.И.* Возможности спутникового радиолокационного мониторинга для решения задач сельского хозяйства [Текст] / Ю.И. Кантемиров, В.Н. Семенов // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 85-89.
4. *Кочубей, С.М.* Количественный анализ формы спектральных кривых отражения листьев растений как способ тестирования их состояния [Текст] / С.М. Кочубей, Н.И. Кобец, Т.М. Шадчина // Физиология и биохимия культурных растений. – 1988. – Т. 20, № 6. – С. 535-540.
5. *Савин, И.Ю.* Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур в России [Текст] / И.Ю. Савин, Е.А. Лупян, С.А. Барталев // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 69-76.
6. *Шадчина, Т.М.* Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових [Текст]: монографія / Т.М. Шадчина. – К.: Фітосоціоцентр. – 2001. – 220 с.
7. *Asrar, G.* Estimation of plant-canopy attributes from spectral reflectance measurements [Text] / G. Asrar, R.B. Myeni, E.T. Kanemasu // In: Theory and Applications of Optical Remote Sensing. Asrar G., Ed.; John Wiley & Sons: New York, USA. – P. 252-296.
8. *Baret, F.* Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment [Text] / F. Baret, G. Guyot // Remote Sens. Environ. – 1991. – 35. – P. 161-173.
9. *Clevers, J.G.P.W.* Estimating APAR by means of vegetation indices: a sensitivity analysis [Text] / J.G.P.W. Clevers, W.Verhoef, H.J.C van Leeuwen // Intern. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Comm. VII, XVII th ISPRS Congress. Washington DC, 1992. – V. XXIX, part B7. – P. 691-698.
10. *Gupta, R.K.* New hyperspectral vegetation characterization parameters [Text] / R.K. Gupta, D. Vijayan, T.S. Prasad // Advances in Space Research. – 2001. – 28. – P. 201-206.
11. *Huete, A.R.* A soil adjusted vegetation index (SAVI) [Text] / A.R. Huete // Remote Sens. Env. – 1988. – 25. – P. 295-309.
12. *Huete, A.R.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [Text] / A.R. Huete, K. Didan, T. Miura [et al.] // Remote Sens. Env. – 2002. – 83. – P. 195-213.
13. *Huete, A.R.* Normalization of multidirectional red and near-red reflectances with the SAVI [Text] / A.R. Huete, G. Hua, J. Qi, A. Chehbouni, W.J. Van Leeuwen // Remote Sens. Env. – 1992. – 40. – P. 1-20.
14. *Lee, K.* Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes [Text] / K. Lee, W.Cohen, R.E.Kennedy [et al.] // Remote Sens. Environ. – 2004. – 91. – P. 508-520.
15. *Perry, C.R.* Functional equivalence of spectral vegetation indices [Text] / C.R. Perry, L.F. Lautenschlager // Remote Sens. Env. – 1984. – 14. – P. 169-182.
16. *Richardson, A.J.* Distinguishing vegetation from soil background information [Text] / A.J. Richardson, C.L. Wiegand // Remote Sens. Env. – 1977. – 8. – P. 307-312.
17. *Rouse, J.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [Text] / J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering // Proceedings. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351. – Greenbelt. – 1974. – P. 3010-3017.
18. *Schwartz, M.D.* Surface phenology and satellite sensor derived onset of greenness: an initial comparison [Text] / M.D. Schwartz, B.C. Reed // Int. J. Remote Sens. – 1999. – 20. – P. 3451-3457.
19. *Wiegand, C.L.* Comparisons among a new soil index and other two and four-dimensional vegetation indices [Text] / C.L. Wiegand, A.J. Richardson // Proceedings of the 48th Annual Meeting Amer. Soc. Photogramm. – 1982. – P. 211-227.
20. *Zhang, X.* Monitoring vegetation phenology using MODIS [Text] / X. Zhang, M.A. Friedl, C.B. Schaaf [et al.] // Remote Sens. Environ. – 2003. – 84. – P. 471-475.

Надійшла 08.08.11