

Академік НАН України В. І. Лялько, З. М. Шпортюк,
О. М. Сибірцева, С. С. Дугін

Застосування гіперспектральних індексів для визначення змін трав'яного покриття за даними спектрометричної зйомки

Досліджено вегетаційні індекси: позиція червоного краю (REP) та Мерісівський наземний хлорофільний індекс (TCI) за даними щорічного наземного спектрометрування трав'яного покриття в трьох точках спостереження з 2009 до 2013 рр. — на тест-ділянках Маріїнського парку, стадіону “Динамо” ім. Валерія Лобановського та набережної р. Дніпро в м. Київ. Найбільший діапазон відхилень від середніх значень для обох індексів встановлено для трав'яного покриття на набережній Дніпра, найменший — для газону стадіону “Динамо”. Встановлено взаємозв'язок між величинами REP й TCI з коефіцієнтом кореляції $r = 0,95$ та побудовано прогнозну модель лінійної регресії залежності REP від TCI ($R^2 = 0,45$, $n = 14$) з коефіцієнтом узгодженості $d = 0,98$. Валідацію моделі здійснено за даними спектрометрування від 06.06.2013 р.

В останні роки багато уваги приділяється моніторингу наземного покриття паркових та припаркових зон методами дистанційного зондування Землі з метою виявлення урбаністичного впливу. Проблеми, які при цьому виникають, та концептуальний підхід до їх розв'язання методами дистанційного зондування розглядаються в праці [1]. Багато наукових публікацій з дистанційного зондування присвячено дослідженням стану трав'яного покриття з використанням позиції червоного краю (REP, the red edge position) спектрів відбиття. Як відомо, зміни стану довкілля внаслідок забруднення води та ґрунтів призводять до змін у рослинному покриві Землі. Ці зміни впливають на спектри відбиття рослинності та спричиняють зміни нахилу спектральної кривої в області червоного краю 650–760 нм і зсуви REP — довжини хвилі, на якій досягається максимум нахилу кривої спектра відбиття в області червоного краю [2].

Гіперспектральне дистанційне зондування рослинного покриття може бути використане для виявлення його змін за допомогою гіперспектральних вегетаційних індексів, визначених у зазначеній області. Зокрема, ряд робіт присвячено дослідженню змін трав'яного покриття з використанням REP за даними гіперспектрального знімання. Так, у роботах [3–5] досліджено вплив забруднення ґрунту на трав'яний покрив через співвідношення між величиною REP і концентрацією хлорофілу в покриві, який проявився в зменшенні (“синій” зсув) величини REP внаслідок вегетаційного стресу, спричиненого забрудненням ґрунту [3, 4]. У науковій публікації [5] досліджувався вплив забруднення ґрунту важкими металами на трав'яний покрив у заплавах річок за даними спектрометричної зйомки. Індикатором забруднень слугували зсуви REP у спектрах відбиття трав'яного покриття. Результати спектрометрування трав'яного покриття на набережній Дніпра у Києві від 15.04.2009 р. [6] використано для зіставлення з даними космознімання сенсора Nuregion території Маріїнського парку та прилеглої частини набережної Дніпра як завіркові при оцінюванні REP.



Рис. 1. Розташування точок спостереження на досліджуваних тест-ділянках, в яких здійснювалося спектрометрування трав'яного покриву спектро радіометром FieldSpec®3 FR у 2009–2013 рр.:

1 — газон стадіону “Динамо”; 2 — газон Маріїнського парку; 3 — трав'яний покрив на набережній Дніпра

Досліджено зміни двох гіперспектральних вегетаційних індексів: *REP* [7] та Мерісівського наземного хлорофільного індексу *TCI* [8] для спектрів відбиття лугової трави за даними спектрометрування наземного покриву над Приозерним нафтовим родовищем (Крим) спектро радіометром FieldSpec®3 FR з метою виявлення нафтогазопошукового сигналу. Для спектрів відбиття лугової трави було встановлено сильну кореляційну залежність між величинами *REP* й *TCI* з коефіцієнтом $r = 0,97$. А зміни величин обох індексів над родовищем стосовно їх величин за межами родовища свідчать про потенційну можливість цих індексів як нафтогазопошукових.

Авторами цього повідомлення продовжуються дослідження характеру змін індексів *REP* й *TCI* за даними щорічної спектрометричної зйомки трав'яного покриву на тест-ділянках у м. Київ: стадіон “Динамо” ім. Валерія Лобановського, Маріїнський парк та набережна р. Дніпро. Спектрометрування здійснювалося спектро радіометром FieldSpec®3 FR з 16 вересня 2009 р. до 7 червня 2013 р. Метою роботи було визначення індексів *REP* й *TCI* за даними спектрометрування трав'яного покриву для моніторингу змін у точках спостереження, встановлення кореляційного зв'язку між індексами та оцінка можливості прогнозування зміни *REP* залежно від *TCI* через побудову моделі лінійної регресії і можливості прогнозування змін трав'яного покриву за змінами значень *REP*, зокрема ідентифікації вегетаційного стресу при зсуві *REP* на підставі побудованої моделі лінійної регресії цієї залежності. Зауважимо, що вперше можливість використання хлорофільного індексу як індикатора вегетаційного стресу, спричиненого просочуванням природного газу над газосховищем, встановлено авторами роботи [9], де вказано на можливість використання індексу *TCI* для визначення змін стану рослинного покриву за даними космознімання тих сенсорів, які мають лише три канали в області червоного краю, що необхідні для визначення *TCI*, і не мають каналів для обчислення *REP*, як, наприклад, сенсор Rapid Eye (<http://www.Rapid-eye-satellite.ru/satellite.ru/satelliteshtml/>).

Проведення вимірювань та аналіз результатів спектрометрування трав'яного покриву. Моніторинг наземного покриву на досліджуваних тест-ділянках у м. Київ проводиться з 2009 р. Спектрометрування трав'яного покриву здійснюється дистанційно в сонячну погоду портативним спектро радіометром FieldSpec®3 FR. Спектр відбиття в хвильовому діапазоні від 350 до 2500 нм відображається в реальному часі на дисплеї. Спектрометрування трав'яного покриву проводилося щорічно в одних і тих самих точках. Дистанція між спектро радіометром і мішенню була не менше ніж 1 м. За мішені трав'яного покриву вибрано такі точки: газон стадіону “Динамо”, газон в Маріїнському парку і трав'яний покрив на набережній Дніпра у м. Київ. Розташування точок спостереження, в яких здійснювалося спектрометрування трав'яного покриву, ілюструє рис. 1.

Зауважимо, що нами використано дані спектрометрування на стадіоні “Динамо” та набережній Дніпра від 16.09.2009, 07.06.2010, 14.09.2010, 14.09.2011, 20.09.2012 і 07.06.2013, а в Маріїнському парку — дані за той самий період, крім даних від 07.06.2010.

За даними спектрометрування в кожній точці спостережень обчислювались значення вегетаційних індексів REP й TCI за такими формулами:

$$REP = 701 + 41 \frac{(\bar{R} - R(701))}{(R(742) - R(701))}, \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R(671) + R(783)}{2},$$

$$TCI = \frac{R(754) - R(708)}{R(708) - R(681)}, \quad (2)$$

де $R(\lambda)$ — значення спектрометричного коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ .

Результати обчислень вегетаційних індексів за даними спектрометрування трав'яного покриття в точках спостереження (див. рис. 1) у 2009–2012 рр. демонструє табл. 1. Згідно з цими даними, найнижчі середньоарифметичні значення індексів REP й TCI характерні для спектрів відбиття трав'яного покриття на набережній: $\overline{REP}_{\min}$ 719,08 нм, $\overline{TCI}_{\min}$ 2,214, а найвищі — для газону стадіону “Динамо”: $\overline{REP}_{\max}$ 721,51 нм, $\overline{TCI}_{\max}$ 2,671. Різниця між максимальними і мінімальними середніми значеннями цих індексів становить для $REP \sim 2,5$ нм, а для TCI — 0,46. Треба відзначити, що середньоквадратичні відхилення від середніх значень найменші для обох індексів спектрів відбиття трав'яного газону стадіону, а найбільші — для спектрів відбиття трави на набережній Дніпра. Це, ймовірно, зумовлене тим, що газон стадіону постійно підтримується в доброму стані і не зазнає шкідливого впливу довкілля. Натомість, трав'яний покрив газону на набережній постійно зазнає шкідливих викидів рухомого поряд транспорту. Це відображається в спектрах відбиття трав'яного покриття зменшенням середнього значення REP на 2,43 нм (“синій” зсув) і TCI на 0,46. Зауважимо, що значення дисперсії понад 2 нм вказують на широкий діапазон розсіювання значень REP для спектрів відбиття на набережній: $716 \text{ нм} \leq REP \leq 723 \text{ нм}$. Аналогічну поведінку спостерігаємо і для величин значень TCI .

За даними обчислень вегетаційних індексів спектрів, наведених на рис. 2, близькі значення REP й TCI характерні для спектрів відбиття в точках спектрометрування газонів стадіону — REP 721,45 нм, TCI 2,808 та Маріїнського парку — REP 721,43 нм, TCI 2,688. Зауважимо, що спектри відбиття в цих точках майже повністю збігаються в хвильовому діапазоні $\lambda \in 350\text{--}850$ нм. У той самий час спектр відбиття трави на набережній відрізняється від вказаних спектрів як значеннями коефіцієнтів відбиття, так і нижчими значеннями індексів (REP 716,83 нм, TCI 1,490). Різниця між значеннями REP для зображених на рис. 2

Таблиця 1. Значення вегетаційних індексів REP й TCI для спектрів відбиття трав'яного покриття за даними спостережень у 2009–2012 рр.

Точки спостережень	Кількість спостережень	REP , нм	TCI
Стадіон “Динамо”	5	$721,51 \pm 0,82$	$2,671 \pm 0,215$
Маріїнський парк	4	$720,14 \pm 1,57$	$2,332 \pm 0,554$
Набережна Дніпра	5	$719,08 \pm 2,45$	$2,214 \pm 1,014$

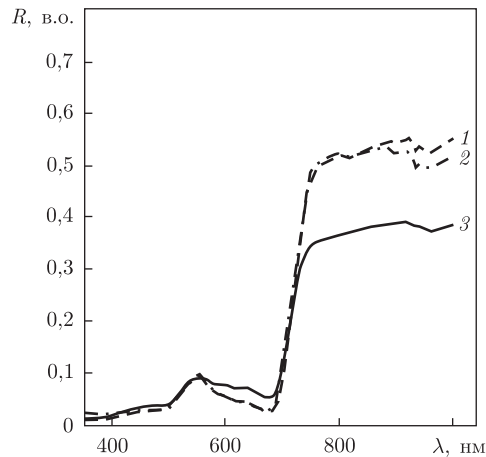


Рис. 2. Зіставлення спектрів відбиття трав'яного покриття за даними спектрометрування від 07.06.2010 р: 1 — газон стадіону “Динамо” (REP 721,45 нм); 2 — газон Маріїнського парку (REP 721,43 нм); 3 — трав'яний покрив на набережній Дніпра (REP 716,83 нм)

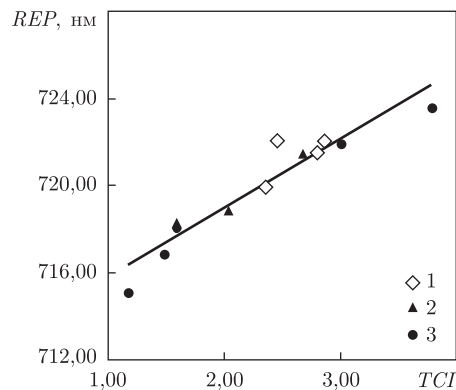


Рис. 3. Корелятивний зв'язок між величинами REP й TCI ($R^2 = 0,45$, $r = 0,95$, $n = 14$) у точках спостереження трав'яного покриття: 1 — газон стадіону “Динамо” ($n = 5$); 2 — газон Маріїнського парку ($n = 4$); 3 — трав'яний покрив на набережній Дніпра ($n = 5$)

спектрів перевищує 4 нм, а значення TCI майже в 2 рази менші, ніж для спектрів відбиття газону стадіону, стан якого майже завжди стабільний.

Зіставлення спектрів відбиття трав'яного покриття в діапазоні $\lambda \in 350\text{--}1000$ нм у трьох точках спостереження демонструє рис. 2. Зменшення значень індексів REP й TCI для спектрів відбиття трави на набережній Дніпра можуть свідчити [3, 4] про гірший, ніж в Маріїнському парку, екологічний стан, на що і вказує “синій” зсув REP , який становить 4,6 нм. Одночасне зменшення REP й TCI в одній і тій самій точці спостережень свідчить, що обидва індекси REP й TCI можуть слугувати індикаторами виявлення вегетаційних стресів трав'яного покриття, зумовлених несприятливими чинниками довкілля.

Взаємозв'язок між величинами REP й TCI для трав'яного покриття за отриманими даними спектрометрування (кількість вимірювань $n = 14$) у трьох точках з 2009 до 2012 рр. показаний на рис. 3. Зауважимо, що восени 2010 р. стан газону на набережній Дніпра був найгіршим, на що вказують найнижчі за весь період спостережень значення обох ве-

гетаційних індексів за даними спектрометрування від 14.09.2010 р. (REP 715,05 нм, TCI 1,179).

Як видно з рис. 3, між значеннями REP й TCI існує сильна кореляція з $r = 0,95$. Значення вегетаційних індексів на графіку змінюються від $REP_{\min} = 715,05$ нм й $TCI_{\min} = 1,179$ (за даними спектрометрування від 14.09.2010 р.) до $REP_{\max} = 723,5$ нм й $TCI_{\max} = 3,799$ (за даними спектрометрування від 20.09.2012 р.). Діапазон зміни REP становить 8,45 нм, а TCI — 2,62. Як максимальні, так і мінімальні значення індексів зафіксовано для спектрів відбиття трав'яного покриву на набережній Дніпра. Високі значення обох вегетаційних індексів для спектрів відбиття трав'яного покриву на набережній восени 2012 р. можна пояснити добрим станом трави внаслідок тривалої теплої дощової погоди та обмеженням автомобільного руху, спричиненим ремонтом дороги. Крім того, тепла дощова погода стимулювала ріст трави як на набережній, так і в Маріїнському парку, де теж спостерігались високі значення індексів REP 721,94 нм й TCI 3,01, які перевищують середньоарифметичні значення $\overline{REP}$ 720,24 нм й $\overline{TCI}$ 2,41 за весь період спостережень. Згідно з даними табл. 1, середні значення вегетаційних індексів за весь період спостережень трав'яного покриву в трьох точках близькі до середніх значень цих індексів за цей самий період спостережень трав'яного покриву в Маріїнському парку. Значення коефіцієнта кореляції, що близьке до 1, вказує на майже лінійну залежність між індексами REP й TCI для спектрів відбиття трав'яного покриву [10]. Модель лінійної регресії залежності REP від TCI для $TCI \in 1,18\text{--}3,80$ має такий вигляд:

$$y(x) = 712,66 + 3,15x, \quad (3)$$

де x — значення TCI , що обчислене за формулою (2), $y(x)$ — $REP(TCI)$, нм.

Коефіцієнт детермінації моделі $r^2 = 0,90$, а середньоквадратичне відхилення $R^2 = 0,45$ для $n = 14$. Згідно з рівнянням (3), прогнозовані значення $REP(TCI)$ змінюються від 716,37 до 724,63 нм для $1,18 \leq TCI \leq 3,80$.

Побудована модель може слугувати для прогнозування зсувів REP щодо його середнього значення за величинами індексу TCI з області визначення.

Коефіцієнт узгодженості (Index of agreement) d моделі (3) з даними вимірювань обчислено за формулою Willmot'a [11, 12]:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (|y(x_i) - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} = 0,98,$$

де y_i — значення REP_i , що обчислені для спектрів відбиття трав'яного покриву за формулою (1); x_i — значення TCI_i , що обчислені за формулою (2); $y(x_i)$ — значення REP_i , що обчислене за формулою (3), відповідне для $x_i = TCI_i$, $i = \overline{1, 14}$, $\bar{y} = \overline{REP}$, $n = 14$.

Значення d , що близьке до 1, свідчить про добру узгодженість прогнозованої моделі з даними вимірювань [11, 12].

Для валідації прогнозованої моделі лінійної регресії (3) використано дані спектрометрування трав'яного покриву від 06 червня 2013 р. у тих самих точках. За даними спектрометрування обчислено значення REP й TCI у постійних точках моніторингу (див. рис. 1). Табл. 2 демонструє значення величин REP_c й TCI_c , що обчислені за формулами (1) й (2),

Таблиця 2. Зіставлення прогнозованих значень $REP_{пр}$ та обчислених за даними спектрометрування від 06.06.2013 р.

Точки спостережень	REP_c , нм	TCI_c	$REP_{пр}$, нм	$\Delta REP = REP_c - REP_{пр}$, нм
Газон стадіону "Динамо"	719,77	2,231	719,69	0,09
Газон Маріїнського парку	718,98	1,843	718,46	0,52
Трав'яний покрив на набережній Дніпра	714,11	1,090	716,09	-1,98

та прогнозовані значення $REP_{пр}$ (TCI_c), що обчислені за формулою (3). З таблиці видно, що прогнозовані за формулою (3) значення $REP_{пр}$ добре узгоджуються з даними спостережень у двох точках, а саме: на газонах стадіону "Динамо" і Маріїнського парку. Найбільшу різницю в значеннях вегетаційних індексів REP для трав'яного покриву на набережній Дніпра майже 2 нм можна пояснити тим, що рівняння регресії (3), вираховане для значень $TCI \geq 1,18$, а $TCI_c = 1,09$, знаходиться за межею області визначення прогнозованої моделі. Встановлення взаємозв'язку між величинами REP й TCI та побудована прогнозна модель лінійної регресії свідчать про потенційну можливість індексу TCI слугувати індикатором вегетаційного стресу, а також про доцільність подальшого його дослідження для вивчення особливостей відбиття рослинного покриву за космознімками тих сенсорів, які мають в області червоного краю три відповідних канали для визначення TCI , як, наприклад, сенсор Rapid Eye, а для обчислення величин REP інформації не вистачає.

Таким чином, результати досліджень вегетаційних індексів REP й TCI за даними щорічного спектрометрування трав'яного покриву спектрорадіометром FieldSpec®3 FR на тест-ділянках з метою виявлення їх змін показали, що за період спостережень з 2009 до 2013 рр. найбільші зміни цих індексів характерні для трав'яного покриву на набережній р. Дніпро, найменші — для газону стадіону "Динамо". Встановлено кореляцію між REP й TCI з коефіцієнтом $r = 0,95$, що вказує на майже лінійну залежність між індексами та свідчить про потенційну можливість TCI , як і REP , реагувати на зміни трав'яного покриву.

Побудовано прогнозну модель лінійної регресії залежності REP від TCI ($R^2 = 0,45$), коефіцієнт якої $d = 0,98$ близький до 1, що свідчить про добру узгодженість побудованої моделі з даними вимірювань. Валідація моделі за даними спектрометрування трав'яного покриву від 06.06.2013 р. підтвердила вказану узгодженість прогнозованої моделі для значень $TCI \in 1,18-3,80$.

Встановлення взаємозв'язку між величинами REP й TCI на підставі лінійної регресії свідчить про потенційну можливість вегетаційного індексу TCI слугувати індикатором вегетаційного стресу і доцільність подальшого його дослідження для вивчення особливостей трав'яного покриву за космознімками сенсорів, які мають у зоні червоного краю лише три канали, що необхідні для визначення TCI , як, наприклад, сенсор Rapid Eye.

1. Jones D. A., Hansen A. I., Bly K. et al. Monitoring land use and cover around parks: A conceptual approach // Remote Sens. Environ. – 2009. – **113**. – P. 1346–1356.
2. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance // Int. J. Remote Sens. – 1983. – **4**. – P. 273–288.
3. Jago R. A., Curran P. J. The effect of land contamination on the relationship between the red edge and chlorophyll concentration of a grassland canopy // RSS'95: Remote Sensing in Action. – Nottingham: Remote Sens. Soc., 1995. – P. 442–449.

4. Jago R. A., Curran P. J. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra to infer levels of land contamination // *RSS'97: Observations and Interactions*. – Redding: Rem. Sens. Soc., 1997. – P. 274–279.
5. Clevers J. G. P. W., Kooistra L., Salas E. A. L. Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data // *Int. J. Remote Sens.* – 2004. – **25**. – P. 1–13.
6. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахалський О. І. та ін. Зіставлення супутникових та наземних гіперспектральних даних при визначенні позиції червоного краю спектрів відбиття // *Косм. наука і технологія*. – 2010. – **16**, № 3. – С. 39–45.
7. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М. та ін. Гіперспектральні індекси для визначення змін рослинного покриву над нафтовим родовищем за даними спектрометричної зйомки // *Геол. журн.* – 2012. – № 4. – С. 79–85.
8. Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // *Int. J. Remote Sens.* – 2004. – **25**. – P. 5403–5413.
9. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М. та ін. Дослідження змін вегетаційних індексів для пшениці над газовим родовищем (підземним газосховищем) за даними гіперспектральної зйомки // *Косм. наука і технологія*. – 2012. – **18**, № 2. – С. 15–19.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – Москва: Высш. шк., 1998. – 480 с.
11. Willmot C. J. On the validation of models // *Phys. Geogr.* – 1981. – **2**, No 2. – P. 184–194.
12. Krause P., Boyle D. P., Bâse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment // *Adv. Geosciences*. – 2005. – **5**. – P. 89–97.

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

Надійшло до редакції 09.10.2011

Академик НАН Украины В. И. Лялько, З. М. Шпортюк, О. Н. Сибирцева, С. С. Дугин

Применение гиперспектральных индексов для определения изменений травяного покрова по данным спектрометрической съемки

Исследованы вегетационные индексы: позиция красного края (REP) и Мерисовский наземный хлорофилльный индекс (TCI) по данным ежегодного наземного спектрометрирования травяного покрова в трех точках наблюдения с 2009 по 2013 гг. — на тест-участках Мариинского парка, стадиона “Динамо” им. Валерия Лобановского и набережной р. Днепр в г. Киев. Наибольший диапазон отклонений от средних значений для обоих индексов установлен для травяного покрова на набережной Днепра, наименьший — для газона стадиона “Динамо”. Установлена взаимосвязь между величинами REP и TCI с коэффициентом корреляции $r = 0,95$, а также построена прогнозная модель линейной регрессионной зависимости REP от TCI ($R^2 = 0,45$, $n = 14$) с коэффициентом согласованности $d = 0,98$. Валидация модели осуществлена по данным спектрометрирования от 06.06.2013 г.

Academician of the NAS of Ukraine V. I. Lyalko, Z. M. Shportiuk, O. M. Sibirtseva, S. S. Dugin

Application of hyperspectral indices for the detection of grass cover changes from spectrometric survey data

The vegetation indices, i. e. the red edge position (REP) and the MERIS terrestrial chlorophyll index (TCI) obtained from the annual terrestrial spectrometry measurements for grass cover at three points of observation for the test sites within the Mariinsky park, “Dynamo” stadium, and the

Dnieper riverbank in the Kyiv city for the period from 2009 to 2013 are studied. The most wide region of shifts from the mean values of these two indices are indicated for grass cover on the Dnieper riverbank, the narrowest one is detected for the “Dynamo” stadium grass lawn. The relationship between REP and TCI values with the correlation coefficient $r = 0.95$ is determined. The prognostic edicted linear regression model for REP versus TCI relation ($R^2 = 0.45$, $n = 14$) with the index of agreement $d = 0.98$ is developed. The model validation is performed using spectrometric data on 06.06.2013.