

УДК 528.813:(633.1:553.981)(477)

В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін, А. І. Воробйов

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ ПШЕНИЦІ НАД ГАЗОВИМ РОДОВИЩЕМ (ПІДЗЕМНИМ ГАЗОСХОВИЩЕМ) ЗА ДАНИМИ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНОЇ ЗЙОМКИ

Досліджено зміни вегетаційних індексів позиції червоного краю REP та мерсієвського наземного хлорофільного індексу TCI під впливом просочування природного газу за даними польової зйомки пшениці над Глібовським газовим родовищем (Крим) та за його межами з 27 травня по 29 травня 2010 р. з метою виявлення газопошукових індексів. Встановлено зменшення величин REP і TCI над газовим родовищем щодо їхніх середніх значень за межами родовища та сильну кореляцію між REP і TCI з коефіцієнтом $r = 0.987$, що свідчить про потенційну можливість TCI слугувати одним із газопошукових індексів.

ВСТУП

Аномальні концентрації природного газу в ґрунті можуть бути наслідком просочування із газових родовищ та газосховищ, так і витіканням із підземних трубопроводів. Встановлено, що у розвитку рослин, які ростуть у місцях із підвищеним вмістом газу в ґрунті, відбуваються зміни, які впливають на спектри відбиття рослинності: зменшується відбиття у ближній інфрачервоній зоні та збільшується відбиття у червоній зоні спектру, що призводить до зміни нахилу спектральної кривої в області червоного краю $\lambda\lambda$ 650–760 нм. Гіперспектральне дистанційне зондування рослинного покриву над газовими родовищами та газопроводами може бути використане для виявлення цих змін за допомогою різноманітних вегетаційних індексів [1, 4–11], визначених в області червоного краю, які є характеристиками вегетаційного стресу.

Так, в роботі [8] досліджувався вплив підвищених концентрацій природного газу на траву, озиму пшеницю та біб, які росли на дослідних ділянках в польових умовах, з використанням відношення похідних спектру на довжинах хвиль $\lambda\lambda$ 725 та 702 нм. При цьому встановлено [8], що

відношення похідних спектрів відбиття для рослин, що росли на загазованій ділянці, були меншими, ніж на контрольній.

В роботах [4–7] досліджувався вплив просочування підземних газоподібних вуглеводнів на позицію червоного краю REP [2, 3] спектрів відбиття рослин, який проявлявся у зменшенні величини REP. Результати цих досліджень використано в роботах [5, 10] для встановлення місць витікання газу із підземного трубопроводу за даними гіперспектральної аерозйомки сенсора НуМар рослинного покриву над трубопроводом. Роботи [9, 11] присвячені розробці методів візуалізації даних гіперспектральної аерозйомки для моніторингу стану рослинності над трубопроводом, забезпечуючи газові компанії інформацією про місця можливих витоків газу із підземних трубопроводів.

Вплив просочування природного газу (метану) із газового родовища на спектри відбиття пшениці за польовими даними спектрометричної зйомки вперше досліджувався авторами в роботі [1]. Вивчалися варіації індексів червоного краю: мерсієвського наземного хлорофільного індексу TCI [2] та позиції червоного краю REP над газовим родовищем та за його межами на одному з маршрутів польової зйомки, де встановлено, що у спектрах відбиття пшениці над газовим родови-

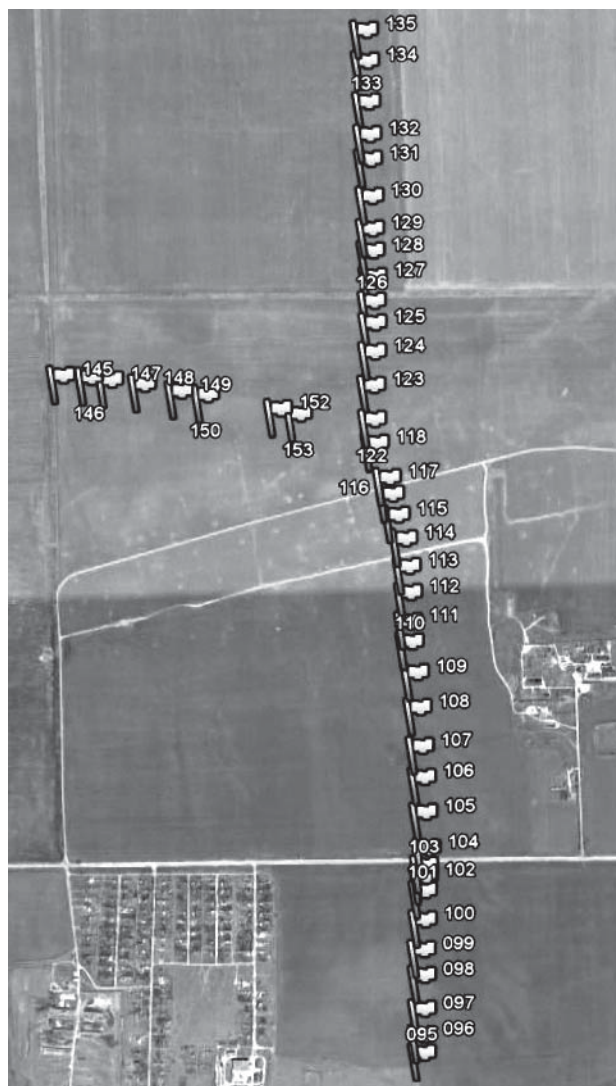


Рис. 1. Схема маршрутів проведення спектрометричної зйомки на Глібовському газовому родовищі в травні 2010 р.: маршрут від 27 травня 2010 р. (22 точки з номерами 95—116); маршрут від 28 травня 2010 р. (15 точок з номерами 118, 123—135); маршрут від 29 травня 2010 р. (8 точок з номерами 145—150, 152, 153)

щем величини *REP* і *TCI* зменшуються порівняно із їхніми значеннями за межами родовища.

В даній роботі продовжується дослідження характеру змін індексів червоного краю *TCI* та *REP* на розширеній множині даних спектрометричної зйомки пшениці над Глібовським газовим родовищем (газосховищем) спектрорадіометром FieldSpec® 3 FR на трьох маршрутах зйомки від

27 травня по 29 травня 2010 р. Крім того, в роботі досліджуються також кореляційні зв'язки між *REP* і *TCI* з метою виявлення можливостей індексу *TCI* слугувати одним із пошукових індексів при розвідуванні родовищ вуглеводнів.

ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ТА АНАЛІЗ ДАНИХ СПЕКТРОМЕТРУВАННЯ

Відомо, що більші високі об'єми міграції вуглеводнів із родовищ нафти і газу спостерігаються в зонах розломів, а найбільш активно ці процеси відбуваються над газовими родовищами. Тому оцінювання використання дистанційних методів зондування для прогнозу нафтогазоперспективних об'єктів проведено на ділянці Глібовського газового родовища.

Глібовське підняття — це субширотна брахіантикліналь, яка виділяється у палеогенових відкладах. Розміри її по ізогіпсі 1090 м становлять 5.5 на 2.0 км, а амплітуда підняття — 210 м. Поклади газоконденсату знаходяться у карбонатних породах нижнього і верхнього палеоцену. Більшість запасів газу приурочена до органогенно-детритових вапняків нижнього палеоцену потужністю до 140 м. Товщина покрівлі, яка залягає над покладами газу, приблизно дорівнює 70 м. Розробка родовища проводилась з 1966 по 1986 рр., а у 1993 р. воно було переведене у сховище газу із запасами близько 388.6 млн кубічних метрів.

Спектрометрування пшениці над Глібовським газовим родовищем проводилося дистанційно в сонячну погоду протягом трьох днів з 27 травня по 29 травня 2010 р. портативним спектрорадіометром FieldSpec® 3 FR. Вимірювання приладу охоплює діапазон $\lambda\lambda = 350\text{—}2500$ нм. Схему маршрутів наземної спектрометричної зйомки з номерами точок, в яких здійснювалось вимірювання спектрів відбиття озимої пшениці, наведено на рис. 1.

Маршрут наземної зйомки в перший день охоплював фонову ділянку [1] за межами покладу (точки 95—105) і ділянку над покладом (точки 106—116). Його протяжність приблизно 2000 м. На другий день проведено спектрометрування пшениці в 15 точках маршруту протяжністю приблизно 1500 м, який за напрямком був продовженням попереднього. Третій маршрут зйомки

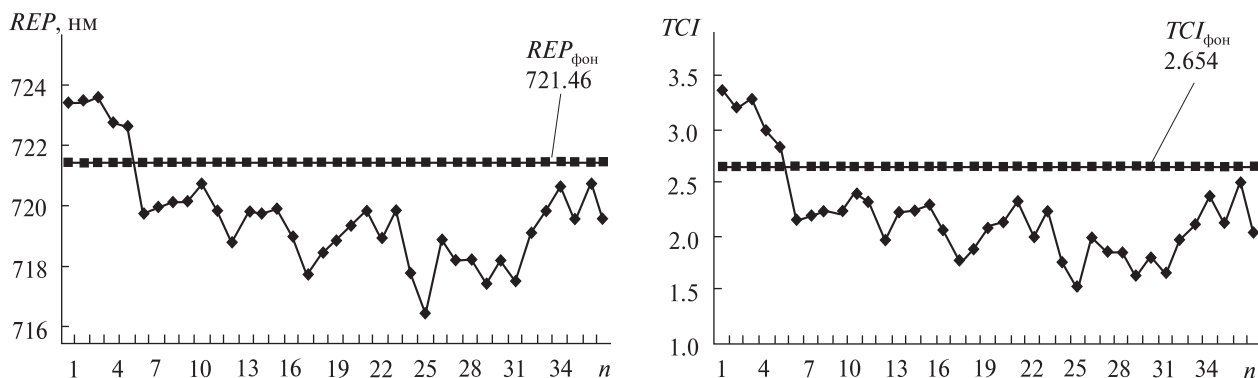


Рис. 2. Значення вегетаційних індексів REP і TCI , обчислені за даними спектрометрування озимої пшениці у 37 точках зйомок n (від 95-ї до 135-ї) маршрутів зйомки від 27 і 28 травня 2010 р. над Глібовським газовим родовищем

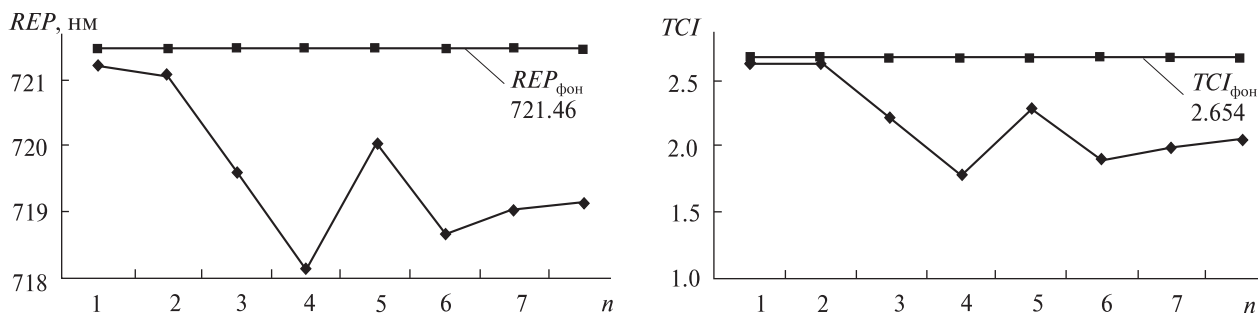


Рис. 3. Те ж для восьми точок (від 145-ї до 153-ї) маршруту зйомки від 29 травня 2010 р.

від 29 травня 2010 р. протяжністю приблизно 800 м охоплював вісім точок і проходив в напрямку, майже перпендикулярному до перших двох, перетинаючи їх в околі 122-ї точки. Вимірювання спектрів відбиття пшениці здійснювалося в 45 точках. В кожній точці обчислювалось значення вегетаційних індексів REP і TCI за 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 .

Графіки вегетаційних індексів на маршрутах наведено на рис. 2 і 3. Надалі в тексті при посиланні на номер n точки на рис. 2—3 відповідний номер на схемі маршруту зйомки (рис. 1) вказується

в дужках. Зауважимо, що на рис. 2 і 3 віддалі між точками не відповідає віддалі між ними на місцевості. Згідно з даними обчислень значення REP змінюються від 716.43 нм в точці 25 (123) до 723.57 в точці 3 (97). Різниця між максимальним і мінімальним значеннями становить 7.14 нм. Фонове значення $REP_{фон}$, обчислене як середнє арифметичне на перших 11 точках маршруту зйомки від 27 травня 2010 р. (рис. 2), становить $REP_{фон} = 721.46$ нм. Різниця між фоновим і мінімальним значеннями в точці 25 (123) дорівнює 5.03 нм. Максимальна величина синього зсуву дорівнює 5.03 нм. Характерною особливістю точок зйомки на маршруті від 29 травня 2011 р. (рис. 3) є те, що значне зменшення REP щодо фонових значення спостерігається у всіх точках, за винятком точок 1 (145) і 2 (146), де значення REP близькі до фонових, що може свідчити про межу газової аномалії, яка пролягає між точками 2 (146) і 3 (147). Найбільша величина голубого зсуву зафіксована в точці 4 (148) і дорівнює 3 нм.

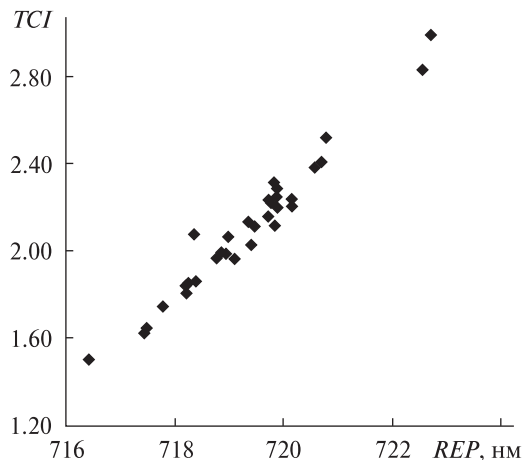


Рис. 4. Корелятивний зв'язок між величинами TCI і REP за даними обчислень в 37 точках маршрутів зйомки (див. рис. 2)

Згідно з даними обчислень наземного хлорофільного індексу TCI його значення змінюються від 1.505 в точці 25 (123) до 3.378 в точці 1 (95) на рис. 2. Фонове значення $TCI_{фон}$, обчислене як середнє арифметичне на перших 11 точках маршруту від 27 травня 2010 р., становить 2.654. Різниця між мінімальним і фоновим, а також максимальним і фоновим значеннями дорівнює -1.049 і 0.724 відповідно. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями TCI дорівнює 1.873. Щодо значень TCI в точках зйомки на маршруті від 29 травня 2010 р. (рис. 3), то характерними для них є, як і для значень REP , відхилення від фонового значення (зменшення) в усіх точках, за винятком точок 1 і 2 (145 і 146 на рис. 1), де значення TCI збігаються із фоновим з точністю до другого знаку після коми.

Як впливає із наведених вище результатів, індекси REP і TCI в умовах вегетаційного стресу, спричиненого просочуванням природного газу над газовим родовищем, мають зменшені значення, ніж за межами родовища, причому обидва індекси досягають глобального мінімуму в одній і тій же 25 (123) точці на рис. 2. Локальні мінімуми двох індексів теж досягаються в одних і тих же точках. Аналізуючи зміни індексів REP і TCI (рис. 2), можна чітко виділити піки двох аномалій, які характеризуються значеннями зсувів REP , величина яких перевищує 3 нм, в синю зону спек-

тру та зменшенням значень TCI щодо фонового значення 2.654 на величину, яка перевищує 0.79. Ці аномалії мають місце (рис. 2) в точках 17 (111), 18 (112) та в околі точки 25 (123), де аномалії мають місце в точках від 24-ї (122) до 31-ї (112).

На рис. 4 показано корелятивну залежність величин TCI і REP в 37 точках маршрутів зйомки (рис. 2). Як видно із проведених обчислень та рис. 2—4 між цими індексами є явна кореляційна залежність. Значення коефіцієнта кореляції між REP і TCI для всіх точок спектрометричної зйомки за формулою Пірсона становить

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{45} (REP_i - \overline{REP})(TCI_i - \overline{TCI})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{45} (REP_i - \overline{REP})^2 \sum_{i=1}^{45} (TCI_i - \overline{TCI})^2}} = 0.987, (3)$$

де REP_i , TCI_i — значення індексів в точці з порядковим номером i ($i = 1, 45$), $\overline{REP} = 719.66$, $\overline{TCI} = 2.1960$ — середні арифметичні значення.

Високе значення r свідчить про майже лінійну залежність між цими величинами і можливість використання індексу TCI як індикатора вегетаційного стресу, спричиненого просочуванням природного газу над газовим родовищем. Зауважимо, що дослідження змін вегетаційного індексу TCI під впливом просочування природного газу та корелятивного зв'язку з індексом REP проведено вперше. Воно є важливим ще і тому, що встановлює потенційну можливість індексу TCI слугувати також одним із газопошукових індексів, який можна використовувати у тому випадку, коли в області червоного краю є відповідні значення коефіцієнтів відбиття лише на трьох довжинах хвиль, а для обчислення REP інформації не вистачає.

На нашу думку, це може дозволити використання з газопошуковою метою сенсорів, які мають у зоні червоного краю необхідні три канали та відповідну просторову розрізненість, як наприклад RapidEye (<http://www.rapideye-satellite.ru/satellite.ru/satellites.html/>).

ВИСНОВКИ

Проведено дослідження наявності аномалій індексів червоного краю REP та TCI , обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування

пшениці над покладом вуглеводнів Глібовського родовища спекторрадіометром FieldSpec® 3 FR.

Досліджено характер змін індексів червоного краю: позиції червоного краю *REP* та наземного хлорофільного індекса *TCI* спектрів відбиття пшениці з метою виявлення пошукового сигналу над покладами вуглеводнів. Встановлено, що в місцях аномально високих концентрацій газоподібних вуглеводнів у ґрунті значення *REP* та *TCI* зменшуються порівняно із їхніми значеннями для фонові ділянки за межами родовища.

Таким чином, гіперспектральне дистанційне зондування рослинного покриву над родовищами газу може бути використане для визначення цих змін. Особливо ефективним є метод комплексного використання двох вегетаційних індексів *REP* та *TCI*. Реагуючи на зміну вмісту хлорофілу в рослинах, ці величини мають менші значення, ніж фонові величини за межами покладу. Вони можуть виявляти вегетаційні стреси у місцях збільшених концентрацій природного газу в ґрунті та слугувати нафтогазопошуковими індексами. Через сильну кореляцію між *REP* та *TCI* ($r = 0.987$) індекс *TCI* може слугувати потенційним газопошуковим індексом. Його можна використовувати у тому випадку, коли в області червоного краю є відповідні значення коефіцієнтів відбиття лише на трьох довжинах хвиль, а для обчислення *REP* інформації не вистачає.

На нашу думку, це може дозволити використання з газопошуковою метою сенсорів, які мають в зоні червоного краю необхідні три канали та відповідну просторову розрізненність, як наприклад RapidEye.

1. *Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О.М. та ін.* Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем // *Космічна наука і технологія*. — 2010. — **16**, № 6. — С. 5—10.
2. *Dash J., Curran P. J.* The MERIS terrestrial chlorophyll index // *Int. J. Remote Sens.* — 2004. — **25**. — P. 5403—5413.
3. *Horler D. N. H., Dockray M., Barber J.* The red edge of plant leaf reflectance // *Int. J. Remote Sens.* — 1983. — **4**. — P. 273—288.
4. *Noomen M. F.* Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage: Ph.D. Dissertation. — Enschede, the Netherlands: International Institute for Geo – International Science and Earth Observation, 2007. — N 145. — 167 p.
5. *Noomen M. F., Skidmore A. K., van der Meer F. D.* Detecting the influence of gas seepage on vegetation using hyperspectral remote sensing // 3-th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy. Herrsching 13—16 May, 2003. — P. 252—256.
6. *Noomen M. F., Skidmore A. K., van der Meer F. D., et al.* The influence of gas pipeline leakage on plant development and reflectance // *Remote Sens. Applications.* — 2004. — P. 637—642. — (25-th ACRS 2004, Thailand).
7. *Noomen M. F., van der Meer F. D., Skidmore A. K.* Hyperspectral remote sensing for detecting the effects of three hydrocarbon gases on maize reflectance // *Proc. of the 31-st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment: Global monitoring for sustainability and security; Saint-Petersburg, 20—24 June, 2005.* — ICRSE International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2005. — 4 p.
8. *Smith K. L., Steven M. D., Coils J. J.* Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks // *Remote Sens. Environ.* — 2004. — **92**, N 2. — P. 2007—2017.
9. *Van der Meijde, van der Werff H., Jansma F., et al.* A spectral-geophysical approach for detecting pipeline leakage // *Int. J. Applied Earth observation and Geoinformation.* — 2009. — **11**, N 1. — P. 77—82.
10. *Van der Werff H. M. A., Noomen M. F., van der Meijde M., et al.* Use of hyperspectral remote sensing to detect hazardous gas leakage from pipelines // *New developments and challenges in remote sensing / Ed. by Z. Bochenek.* — Rotterdam: Millpress, 2007. — P. 707—714.
11. *Van der Werff H., van der Meijde M., Jansma F., et al.* A spatial-spectral approach for visualization of vegetation stress resulting from pipeline leakage // *Sensors.* — 2008. — **8**. — P. 3733—3743.

Надійшла до редакції 21.11.11

V. I. Lyalko, Z. M. Shportjuk, O. N. Sibirtseva, S. S. Dugin, A. I. Vorobiev

AN INVESTIGATION OF CHANGES IN VEGETATION INDICES FOR WHEAT OVER A GAS FIELD (UNDERGROUND GAS STORAGE FACILITY) ON THE BASIS OF HYPERSPECTRAL DATA

Some changes in values of vegetation indices for the red edge position (REP) and MERIS terrestrial chlorophyll index (TCI) affected by natural gas leakage are investigated. The study is made on the basis of the field survey of wheat crops over the Hlibovske gas field (Crimea) and beyond its boundaries from 27 May to 29 May 2010 which was aimed to reveal gas searching indices. Some decrease in REP and TCI values over the gas field relative to their mean ones beyond the gas field boundaries is found and some strong correlation between REP and TCI with $r = 0.987$ is detected. This testifies that the TCI is potentially one of the gas searching indices.