

З. М. Шпортюк, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін

Вплив просочування природного газу на наземний хлорофільний індекс та позицію червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем

(Представлено академіком НАН України В. І. Ляльком)

Визначено варіації спектротричних коефіцієнтів відбиття пшениці, мерисівського наземного хлорофільного індексу TCI та позиції червоного краю REP за польовими даними спектродіаметра $Field\ Spec^{\text{®}}$ 3 FR під впливом просочування природного газу над Глібовським газовим родовищем (Крим). Встановлено сильну кореляцію між індексами REP й TCI з коефіцієнтом $r = 0,987$ та зменшення величин цих індексів на газонасній території щодо їх фонових значень за межами родовища.

Як відомо [1–5], спектри відбиття рослинності реагують на просочування природного газу в ґрунті аномальними спектральними зсувами позиції червоного краю REP (the Red Edge Position). Розвиток гіперспектральних сенсорів для дистанційного зондування земної поверхні дозволив застосовувати цю властивість рослинного покриву для виявлення вегетаційних стресів, спричинених витіканням нафти із нафтопроводів [6] та газу із газопроводів [7, 8]. Відомо також використання гіперспектральних даних сенсора Hyperion для розвідування газових родовищ [9].

Виведення на орбіту в 2002 р. супутника Envisat із суперспектральним сенсором MERIS, одним із продуктів якого є індекс $MTCI$ (*Meris terrestrial chlorophyll index*) [10], дало змогу використовувати його для моніторингу рослинного покриву, що було успішно здійснено нами для класифікації земного покриву Українських Карпат [11, 12] за даними сенсора MERIS. Позначимо цей індекс для даних спектродіаметра $FieldSpec^{\text{®}}$ 3 FR через TCI .

Метод дослідження варіацій індексів REP спектрів відбиття пшениці над родовищем газу, згідно з даними наземного спектрометрування спектродіаметром $FieldSpec^{\text{®}}$ 3 FR , описаний в публікації [13]. Мета даної роботи — дослідження змін у спектрах відбиття рослинності та у величинах індексів TCI й REP під впливом просочування природного газу, а також встановлення кореляції між цими індексами, оскільки кількісні характеристики їх можуть слугувати ключем для прогнозування аномалій вуглеводнів у ґрунті на підставі даних наземного гіперспектрального дистанційного зондування пшениці.

Обчислення індексів червоного краю за даними спектродіаметра $FieldSpec^{\text{®}}$ 3 FR . Методика виявлення оптичної аномалії на даних спектротричної зйомки рослинності над покладами вуглеводнів (ВВ) орієнтована на кількісну оцінку зміни оптичних спектральних характеристик рослинності, серед яких особливу роль відіграють такі індекси червоного краю, як позиція REP та наземний хлорофільний індекс TCI .

Обидва індекси залежать від вмісту хлорофілу в рослинах — показника здоров'я. Оскільки аномальні концентрації ВВ у ґрунті впливають на здоров'я та ріст рослин [5], то зміни в рослинах, які спричинені покладами ВВ, що відбиваються в оптичних характеристиках, можна використовувати як індикатори аномалій просочування вуглеводнів у ґрунті. З розвитком гіперспектрального дистанційного зондування Землі з високим просторовим

та спектральним розділенням стало можливим кількісно оцінити стан рослинності [11, 12] за вегетаційними індексами *REP*.

Обчислення індексу *REP*. Згідно з методом 4-точкової лінійної інтерполяції, *REP* (у нм) для даних спектрорадіометра FieldSpec[®] 3 FR обчислюється за такими формулами:

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

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

де R — значення спектрометричного коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ .

Обчислення індексу *TCI*. Згідно з позначенням [7], для даних спектрорадіометра FieldSpec[®] 3 FR наземний хлорофільний індекс *TCI* це — відношення різниці коефіцієнтів відбиття при $\lambda = 754$ й 708 нм до різниці коефіцієнтів відбиття при $\lambda = 708$ й 681 нм:

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

Із наведених вище формул видно, що для обчислення індексу *TCI* потрібно менше інформації — значення R на 3-х довжинах хвиль, а для обчислення індексу *REP* — значення R у 4-х точках хвильового діапазону.

Проведення вимірювань та аналіз даних. Спектрометрування пшениці над Глібовським газовим родовищем проведено дистанційно в сонячну погоду 27 травня 2010 р. портативним спектрорадіометром FieldSpec[®] 3 FR. Вимірювання спектрів відбиття пшениці здійснювалось у 22-х точках. Маршрут наземного знімання охоплював 11 точок на фоновій ділянці за межами родовища та 11 точок над Глібовським газовим родовищем [13]. Протяжність маршруту приблизно 2 км. Відстань між точками спектрометрування близько 100 м. У кожній точці, згідно з даними наземних вимірювань, обчислено коефіцієнти відбиття пшениці на відрізку [350, 2500] нм та вегетаційні індекси *REP* й *TCI*, згідно з формулами (1) й (2). Обчислено фонові значення (ф) вегетаційних індексів як середні арифметичні їх значення в 11-ти точках на фоновій ділянці за межами родовища за такими формулами:

$$REP_{\text{ф}} = \frac{\sum_{i=1}^{11} REP_i}{11}, \quad (3)$$

$$TCI_{\text{ф}} = \frac{\sum_{i=1}^{11} TCI_i}{11}. \quad (4)$$

Відмінності в спектрах відбиття пшениці, що спричинені просочуванням природного газу, демонструє рис. 1, на якому представлені спектрометричні коефіцієнти відбиття як функції довжини хвилі $R = R(\lambda)$ на відрізку [350, 1000] нм для пшениці, що росла за межами родовища $R_1(\lambda)$ (точка 5 на рис. 2, а) та над Глібовським газовим родовищем $R_2(\lambda)$ (точка 17). Дані наземних вимірювань спектрорадіометром FieldSpec[®] 3 FR отримано 27.05.2010 р.

При зіставленні наведених на рис. 1 кривих видно, що над газовим родовищем значення $R_2(\lambda)$ на відрізку $\lambda \in [350, 680]$ нм збільшується, а на відрізку $\lambda \in [740, 1000]$ нм зменшується щодо відповідних значень $R_1(\lambda)$ для пшениці за межами родовища. Зокрема якщо

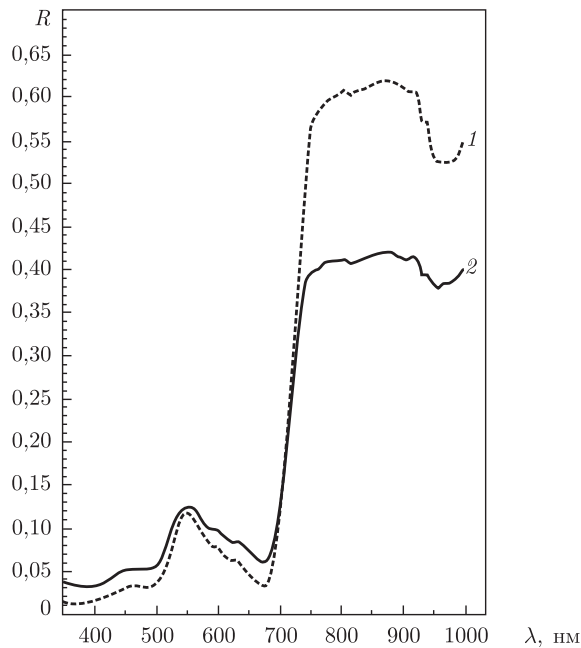


Рис. 1

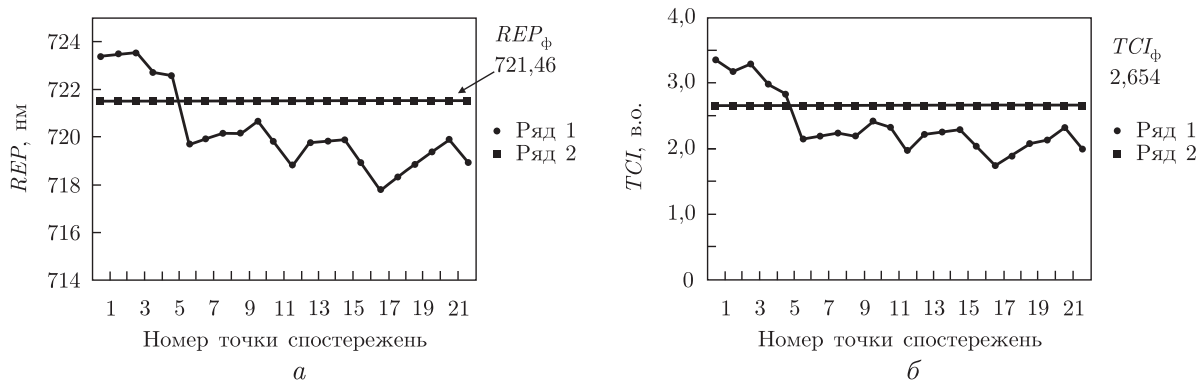


Рис. 2

приріст функції $R_1(\lambda)$ на відрізку $\lambda \in [700, 750]$ нм становить 0,45, то для функції $R_2(\lambda)$ — лише 0,30. Такі зміни відбиття пшениці над газовим родовищем призводять до зменшення величин REP (так званий голубий зсув) і TCI . Так, для значення $R_2(\lambda)$ $REP = 717,76$ нм, $TCI = 1,75$, а для значення $R_1(\lambda)$ $REP = 722,57$ нм, $TCI = 2,83$. Величини відхилень індексів відповідно дорівнюють: для REP $\Delta REP = 717,76 \dots - 722,57$ нм = $-4,81$ нм, для TCI $\Delta TCI = 1,76 \dots - 2,83 = -1,08$. Зсув REP до коротких довжин хвиль становить понад 4 нм.

Графіки величин вегетаційних індексів REP (а) та TCI (б) у точках маршруту спектрометричної зйомки пшениці на Глібовському газовому родовищі демонструє рис. 2. На горизонтальній осі рисунку а і б нанесено порядкові номери точок проведення вимірювань: точки 1–11 розташовані за межами родовища, точки 12–22 — над Глібовським газовим родовищем. Зауважимо, що на рисунках віддалі між точками умовна і не відповідає відстані між точками на місцевості. Також позначено фонові значення індексів

сів: $REP_{\phi} = 721,46$ нм та $TCl_{\phi} = 2,654$, які обчислені за формулами (3) й (4) відповідно.

Значення REP змінюються в межах від 717,76 нм (точка 17) до 723,57 нм (точка 3). Середнє арифметичне значення на профілі $REP_{сер} = 720,28$ нм. Різниця між фоновим REP_{ϕ} та середнім значеннями $REP_{сер}$ дорівнює 1,17 нм. Середнє арифметичне значення над покладом $REP_{п}$ менше, ніж значення $REP_{сер}$. Різниця між значеннями REP_{ϕ} та $REP_{п}$ дорівнює 2,35 нм. Величина “голубого зсуву” становить 2,35 нм. Таким чином, різниця між фоновим значенням REP і середнім значенням над покладом перевищує 2 нм. Різниця між фоновим значенням REP та мінімальним значенням дорівнює 3,7 нм.

Згідно з даними обчислень індексу TCl , у точках маршруту (див. \bar{b} на рис. 2) його значення змінюються в межах від $TCl_{min} = 1,75$ (точка 17) до $TCl_{max} = 3,378$ (точка 1). Середнє арифметичне значення на маршруті $TCl_{сер} = 2,367$. Різниця між мінімальним і фоновим значеннями TCl : $TCl_{min} - TCl_{\phi} = -0,954$, а між максимальним і фоновим значеннями становить: $TCl_{max} - TCl_{\phi} = 0,724$. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями TCl дорівнює 1,628.

Аналізуючи графіки варіацій індексів REP й TCl для спектрів відбиття пшениці (див. рис. 2), можна зробити висновок, що між цими величинами існує значима кореляційна залежність. Коефіцієнт кореляції дорівнює 0,987.

Наведені результати досліджень свідчать про те, що комплексне використання двох індексів (REP й TCl), які реагують на зміну вмісту хлорофілу в пшениці, що відзначається в спектрах відбиття і в значеннях вегетаційних індексів, може слугувати методом виявлення вегетаційних стресів і відповідно аномальних від’ємних значень вегетаційних індексів у місцях аномальних концентрацій газоподібних вуглеводнів у ґрунті, а також бути нафтогазопошуковими індексами.

Отже, можна зробити такі висновки: вперше було проведено дослідження наявності аномальних індексів червоного краю REP та наземного хлорофільного індексу TCl , обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування пшениці над покладом ВВ Глібовського газового родовища спектро радіометром FieldSpec[®] 3 FR. У ході досліджень встановлено, що здоров’я рослин зазнає впливу аномальних концентрацій газу в ґрунті, що відзначається в спектрах відбиття в зоні червоного краю зменшенням коефіцієнтів відбиття в близькій інфрачервоній зоні спектра та збільшенням у червоній (див. рис 1).

Досліджено характер змін індексів червоного краю REP й TCl : позиції червоного краю спектрів відбиття пшениці з метою виявлення пошукового сигналу над покладами ВВ. Встановлено, що в місцях аномально високих концентрацій газоподібних вуглеводнів у ґрунті значення індексів REP й TCl зменшуються порівняно із їх значеннями для фонові ділянки за межами родовища.

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 й TCl , які мають високий коефіцієнт кореляції, що дорівнює 0,987. Реагуючи на зміну вмісту хлорофілу в рослинах зменшенням їх величин над покладом ВВ у порівнянні з фоновими значеннями за межами покладу, вони можуть виявляти вегетаційні стреси в місцях збільшених концентрацій природного газу в ґрунті і таким чином слугувати нафтогазопошуковими індексами.

1. McCoy R. M., Scott L. F., Hardin P. The spectral response of sagebrush in areas of hydrocarbon production: Proc. of the 7th Thematic conf. on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Alberta, Canada, Okt. 2–6, 1989. – Ann Arbor, Michigan: Environmental Research Inst., 1989. – P. 751–756.

2. *Noomen M. F., Skidmore A. K., van der Meer F. D. et al.* The influence of gas pipeline leakade on plant development and reflectance: Proc. of the 25th Asian conf. on Remote Sensing, Thailand, Nov. 22–26, 2004. – Chiang Mai, 2004. – **1./2.** – P. 637–642.
3. *Noomen M. F., Skidmore A. K., van der Meer F. D.* Detecting the influence of gas seepage on vegetation using hyperspectral remote sensing: Proc. of the 3th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy, Herrsching, Germany, May 13–16, 2003. / Eds. M. Habermeyer, A. Mulle, S. Holzwarth. – Herrsching, 2003. – P. 252–256.
4. *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 31st Intern. symp. on Remote Sensing of Environment: Global monitoring for sustainability and security, Saint-Petersburg, June 20–24, 2005. – Saint-Petersburg: CD-ROM publ., 2005. – 4 p.
5. *Noomen M. F.* Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage. – Intern. Inst. for Geo-Intern. Sci. and Earth Observation. – Enschede, the Netherlands (ITC). – 2007. – No 145. – 167 p.
6. *Li L., Ustin S. L., Lay M.* Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico // Remote Sens. Env. – 2004. – **94.** – P. 1–16.
7. *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.
8. *Noomen M. F., Smith K. L., Steven M. D. et al.* Hyperspectral indices for detecting changes in canopy reflectance as a result of underground natural gas leakage // Int. J. Remote Sens. – 2008. – **29.** – P. 5987–6008.
9. *Xu D.-Q., Ni G.-Q., Jiang L.-L. et al.* Exploring for natural gas using reflectance spectra of surface soils // Adv. Space Res. – 2008. – **41.** – Is. 11. – P. 1800–1817.
10. *Dash J., Curran P. J.* The MERIS terrestrial chlorophyll index // Int. J. Remote Sens. – 2004. – **25.** – P. 5403–5413.
11. *Shportyuk Z. M., Sakhatsky A. I., Sibirtseva O. N.* Land cover classification in Ukrainian Carpathians using the MERIS Terrestrial Chlorophyll index and red edge position from Envisat MERIS data: Proc. of Mid-Term Symp. ISPRS “Remote Sensing: From Pixels to Processes”. – Enschede, the Netherlands, May 8–11, 2006. – Enschede, the Netherlands (ITC), 2006. – P. 353–357.
12. *Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибіртцева О. М.* Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільного індексу та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS // Косм. наука і технологія. – 2006. – **12,** № 5/6. – С. 10–14.
13. *Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибіртцева О. М. та ін.* Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем // Там само. – 2010. – **16,** № 6. – С. 5–10.

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

Надійшло до редакції 29.03.2011

Z. M. Shportjuk, O. N. Sibirtseva, S. S. Dugin

The influence of natural gas seepage on the terrestrial chlorophyll index and the red edge position of wheat reflectance spectra over the gas field

We detected the influence of natural gas seepage on the variances of wheat reflectance spectra, MERIS terrestrial chlorophyll index TCI, and red edge position (REP) from the field spectrometric Field Spec[®] 3 FR data over the Hlibovske gas field (the Crimea). We found the strong correlation ($r = 0.987$) between REP and TCI and some decrease in REP and TCI values over the gas field relative to their mean values outside the gas field.