

УДК 528.813:(633.1:553.981)(477)

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

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук
Національної академії наук України, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАЦІЙ ІНДЕКСІВ ЧЕРВОНОГО КРАЮ СПЕКТРІВ ВІДБИТТЯ ПШЕНИЦІ НАД ГАЗОВИМ РОДОВИЩЕМ

Спектротрування пшениці над Глібовським газовим родовищем (Крим) проведено спектро радіометром FieldSpec® 3 FR 27.05.2010 р. Визначалися варіації вегетаційних індексів позиції червоного краю REP та мерісівського наземного хлорофільного індекса TCI за польовими спектрометричними даними під впливом просочування газу. Встановлено зменшення величин REP та TCI над газовим родовищем щодо їхніх середніх значень за межами родовища.

ВСТУП

Біогеофізичне картування аномалій природного газу у ґрунті та приховних покладів мінералів за даними гіперспектральної зйомки рослинного покриву бере свій початок в дослідженнях американських учених. Так, ідея біогеофізичного картування скритих покладів мінералів за гіперспектральними даними аерознімання лісового покриву належить американському дослідникові У. Коллінзу із колегами, які відкрили явище голубого зсуву у спектрах відбиття хвойних лісів як відгук на геохімічний стрес [5, 6, 8]. Це явище було підтверджене Мілтоном [12] у спектрах відбиття змішаних листопадних лісів, які покривають ділянки із покладами сульфідів міді. У роботі [8] відзначено, що явище голубого зсуву, продемонстроване для спектрів відбиття хвойних і широколистяних лісів в різних місцевостях і рослинних покривах, може бути універсальним пігментним відгуком деяких зелених рослин на специфічні типи геохімічного стресу, що підтверджено лабораторними дослідженнями [5].

Вплив просочування підземних газоподібних вуглеводнів на спектри відбиття рослинності досліджувався у роботах [10, 11, 13–17, 19]. Аномальні концентрації природного газу у ґрунті можуть бути спричинені як витоком газу з підземних газопроводів, так і просочуванням при-

родного газу. Встановлено, що здоров'я рослин зазнає впливу аномальних концентрацій газу у ґрунті. Дистанційне зондування рослинного покриву над родовищами вуглеводнів може бути використане для визначення цих змін.

Як відомо [7, 9], в зоні червоного краю $\lambda\lambda = 660\text{--}780$ нм для рослин характерні високі значення коефіцієнтів відбиття та різка швидкість їхнього збільшення, що залежить від виду рослинного покриву. Довжина хвилі, на якій швидкість зміни спектру відбиття максимальна, називається позицією червоного краю (REP) і належить до множини вегетаційних індексів червоного краю, які можна визначати за гіперспектральними даними. Погіршення здоров'я рослин часто фіксується в спектрах як зменшення відбиття в БІЧ-області спектра та збільшення в червоній. Це призводить до зсувів REP до коротких довжин хвиль — так званий «голубий зсув». У деяких дослідженнях впливів просочування газових вуглеводнів на спектри відбиття рослинності реєструвався також і «червоний зсув» [10]. Через це нема ще повного розуміння наслідків впливів просочування вуглеводнів на здоров'я рослин та їхні спектри відбиття. Згідно з деякими дослідженнями високі концентрації вуглеводнів у ґрунті призводять до зменшення росту рослин і «голубого зсуву» REP , а низькі концентрації, навпаки, — до «червоного зсуву» REP .

Дослідження цих питань в працях [13, 19] підтвердило, що зсуви REP спектрів відбиття рослинності, одержані в результаті гіперспектраль-

ної зйомки, можуть бути використані як індикатори аномалій концентрацій газоподібних вуглеводнів в ґрунті.

Одним із продуктів сенсора MERIS для моніторингу стану рослинності є індекс MTCI [7], який, як і *REP*, характеризує вміст хлорофілу у покриві і менш чутливий до атмосферних ефектів, ніж *REP*.

Позначимо цей індекс для даних спектрорадіометра FieldSpec® 3 FR через *TCI*.

Мета даної роботи — дослідження характеру змін індексів червоного краю *REP* та *TCI*, обчислених за даними спектрометрування пшениці спектрорадіометром FieldSpec® 3 FR над Глібовським газовим родовищем.

Дослідження оптичних аномалій у спектрах відбиття рослин, обумовлених покладами вуглеводнів за даними аерокосмічних зйомок виконуються в ЦАКДЗ ІГН НАНУ понад 10 років [1]. Зокрема, у серпні 2004 р. проведено фітоіндикаційну зйомку, за результатами якої оцінювались відбивні характеристики листя берези у трьох спектральних піддіапазонах. Закономірність (графік) зміни відбивної здатності листя берези у червоній зоні спектра наведено в роботі [1].

Індекси червоного краю *REP* та *TCI* за гіперспектральними даними наземного спектрометрування рослинності на Глібовському газовому родовищі досліджуються вперше.

МЕТОДИ ОБЧИСЛЕННЯ ІНДЕКСІВ ЧЕРВОНОГО КРАЮ ЗА ДАНИМИ СПЕКТРОРАДІОМЕТРА FIELDSPЕC® 3 FR

Методика виявлення оптичної аномалії на даних спектрометричної зйомки рослинності над покладами вуглеводнів орієнтована на кількісну оцінку зміни оптичних спектральних характеристик рослинності, серед яких особливу роль відіграють позиція червоного краю *REP* та наземний хлорофільний індекс *TCI*.

Обидва ці індекси залежать від вмісту хлорофілу в рослинах, який є показником їхнього здоров'я. Оскільки аномальні концентрації вуглеводнів у ґрунті впливають на здоров'я рослин [13], то зміни в рослинах, спричинені покладами вуглеводнів, які відбиваються в оптичних характеристиках, можуть бути використані як індика-

тори аномалій просочування вуглеводнів в ґрунті. Із розвитком гіперспектрального дистанційного зондування Землі з високою просторовою та спектральною розрізненністю з'явилась можливість кількісної оцінки стану рослинності [19] за вегетаційними індексами червоного краю. Зауважимо, що ці індекси вже знайшли широке застосування в дослідженнях ЦАКДЗ, зокрема при класифікації рослинного покриву Карпат за даними відеоспектрометра ENVISAT MERIS [3, 18] та дослідженнях рослинного покриву Київської області за гіперспектральними даними космознімання EO-1 «Hyperion» [2, 4].

Наведемо формули для обчислення *REP* та *TCI* за даними спектрорадіометра FieldSpec® 3 FR.

Обчислення *REP*. Згідно з методом 4-точкової лінійної інтерполяції значення *REP* для даних спектрорадіометра FieldSpec® 3 FR обчислюються за формулами

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

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

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

Обчислення *TCI*. Згідно з означенням [7] для даних спектрорадіометра FieldSpec® 3 FR наземний хлорофільний індекс *TCI* — це відношення різниці коефіцієнтів відбиття на довжинах хвиль λ 754 нм і λ 708 нм до різниці коефіцієнтів відбиття на довжинах хвиль λ 708 нм і λ 681 нм:

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

ВИМІРЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ДАНИХ

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

Глібовське підняття — це субширотна брахіантіклиналь, яка виділяється у палеогенових від-



Рис. 1. Схема маршруту проведення спектрометричної зйомки на Глібовському газовому родовищі 27.05.2010 р.

кладах. Розміри її по ізогіпсі 1090 м становлять 5.5 на 2.0 км, а амплітуда підняття — 210 м. Поклади газоконденсату перебувають у карбонатних породах нижнього і верхнього палеоцену. Більшість запасів газу приурочена до органічно-детритових вапняків нижнього палеоцену потужністю до 140 м. Товщина покрівлі, яка залягає над покладами газу, приблизно дорівнює 70 м. Розробка родовища провадилась 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 проведено дистанційно в сонячну погоду 27 травня 2010 р. портативним спекторадіометром FieldSpec® 3 FR. Вимірювання приладу охоплює діапазон 350—2500 нм. Маршрут наземної зйомки охоплював фонову ділянку [1] за межами покладу (точки 95—105) і ділянку над покладом (точки 106—116). Протяж-

ність маршруту приблизно 2000 м. Схема маршруту наземної зйомки з номерами точок, в яких здійснювалось вимірювання спектрів пшениці, наведена на рис. 1.

Вимірювання спектрів відбиття пшениці здійснювалось у 22-х точках. В кожній точці обчислювались значення вегетаційних індексів червоного краю за наведеними вище формулами (1), (2). Графіки величин вегетаційних індексів на маршруті наведено на рис. 2.

На рис. 2 на горизонтальній осі нанесено номери N точок проведення вимірювань: номер точки відповідає позначенням на рис. 1. Зауважимо, що на рис. 2 віддаль між точками вимірювань умовна і не відповідає дійсній віддалі між ними на місцевості.

Згідно з даними обчислень значення REP змінюються від 717.76 нм (точка 111) до 723.57 нм (точка 97). Середнє арифметичне значення на профілі $REP_{сер} = 720.28$ нм. Фонове значення

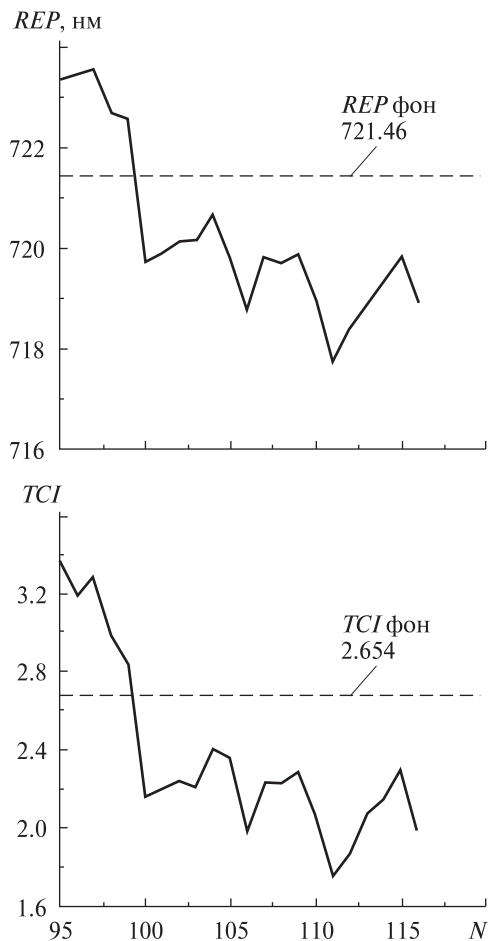


Рис. 2. Значення вегетаційних індексів червоного краю REP та TCI спектрів пшениці у точках маршруту спектральної зйомки на Глібовському газовому родовищі

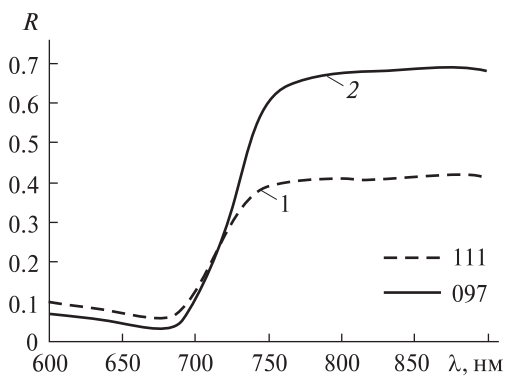


Рис. 3. Спектральні коефіцієнти відбиття R пшениці у точках з мінімальним $REP = 717.76$ нм (1) і максимальним $REP = 723.57$ нм (2) значеннями

REP , обчислене як середнє арифметичне значень REP на перших 11 точках маршруту, дещо відрізняється від $REP_{\text{сер}}$ і становить $REP_{\text{фон}} = 721.46$ нм. Різниця між фоновим і середнім значеннями $REP_{\text{фон}} - REP_{\text{сер}} = 1.17$ нм. Середнє арифметичне значення над покладом $REP_{\text{п}}$ менше, ніж $REP_{\text{сер}}$ і $REP_{\text{фон}}$. Різниця $REP_{\text{фон}} - REP_{\text{п}} = 2.35$ нм. Величина «голубого зсуву» дорівнює 2.35 нм. Таким чином, різниця між фоновим значенням REP і значенням його над покладом перевищує 2 нм. Різниця між фоновим значенням $REP_{\text{фон}}$ і мінімальним значенням дорівнює 3.7 нм.

На рис. 3 наведено фрагменти спектрів відбиття пшениці в діапазоні $\lambda\lambda$ 600–900 нм в точках з мінімальним (111-та точка) та максимальним (97-ма точка) значеннями REP .

Зіставлення зображених на рис. 3 фрагментів спектрів свідчить, що голубий зсув величиною 5.81 нм у спектрах є наслідком зменшення коефіцієнтів відбиття від $R = 0.69$ до $R = 0.41$ у ближній інфрачервоній зоні спектру і збільшення коефіцієнтів відбиття приблизно на 0.02 у червоній зоні спектру. Максимальний голубий зсув REP над покладом щодо фонового значення $REP_{\text{фон}}$ дещо менший та дорівнює 3.7 нм.

Згідно з даними обчислень наземного хлорофільного індексу TCI в точках маршруту (рис. 2) його значення змінюються в межах від $TCI_{\text{мін}} = 1.75$ у 111-й точці до $TCI_{\text{макс}} = 3.378$ в 95-й точці. Фонове значення $TCI_{\text{фон}}$, обчислене як середнє арифметичне значень TCI на перших 11 точках, становить $TCI_{\text{фон}} = 2.654$, а середнє арифметичне значення на маршруті $TCI_{\text{сер}} = 2.367$. Різниця між мінімальним і фоновим значеннями дорівнює -0.954 , а між максимальним і фоновим значеннями становить 0.724. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями TCI дорівнює 1.628.

Як впливає із наведених результатів обчислень, обидва індекси досягають мінімуму в одній і тій же 111-й точці, що відповідає голубому зсуву REP на 3.7 нм та свідчить про зменшення хлорофілу у пшениці. Зуважимо, що наявність голубого зсуву величиною понад 2 нм у цій точці може вказувати на стійку аномалію газоподібних вуглеводнів у ґрунті, що є причиною вегетаційного стресу.

Видно також, що у випадку високого вмісту хлорофілу в рослинах індекс *TCI* більш чутливий до його зміни, ніж *REP*.

Наведені результати досліджень свідчать про те, що комплексне використання індексів *REP* та *TCI*, які реагують на зміну вмісту хлорофілу в пшениці, може слугувати методом виявлення вегетаційних стресів та аномальних від'ємних значень вегетаційних індексів в місцях аномальних концентрацій газоподібних вуглеводнів в ґрунті і, таким чином, може бути одним із нафтогазопошукових індексів.

ВИСНОВКИ

Проведено вперше дослідження наявності аномалій індексів червоного краю *REP* та *TCI*, обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування пшениці над покладом вуглеводнів Глібовського родовища спектро радіометром FieldSpec® 3 FR. В результаті досліджень встановлено, що здоров'я рослин зазнає впливу аномальних концентрацій газу у ґрунті, що відображається в спектрах відбиття в зоні червоного краю зменшенням коефіцієнтів відбиття у ближній інфрачервоній зоні спектру та збільшенням у червоній (рис. 3).

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 у 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 вегетаційних індексів *REP* та *TCI*. Реагуючи на зменшення вмісту хлорофілу в рослинах над покладом у порівнянні з фоновими значеннями за межами покладу, вони можуть виявляти місця збільшених концентрацій природного газу у ґрунті.

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред.

- В. І. Лялька, М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006. — 358 с.
2. Лялька В. І., Сахацький О. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М. Використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними EO-1 «Hyperion» для класифікації земного покриву // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 3. — С. 55—68.
3. Лялька В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М. Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільного індекса та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS // Космічна наука і технологія. — 2006. — **12**, № 5/6. — С. 10—14.
4. Лялька В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І. та ін. Зіставлення супутникових та наземних гіперспектральних даних при визначенні позиції червоного краю спектрів відбиття // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 3. — С. 39—45.
5. Chang S.-H., Collins W. Confirmation of the Airborne Biogeophysical Mineral Exploration Technique Using Laboratory Methods // Econ. Geol. — 1983. — **78**, N 4. — P. 723—736.
6. Collins W., Chang S.-H., Raines G., et al. Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits // Econ. Geol. — 1983. — **4**, N 78. — P. 737—749.
7. Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // Int. J. Remote Sens. — 2004. — **25**. — P. 5403—5413.
8. Goetz A., Rock B., Rowan L. Remote Sensing for Exploration: An Overview // Econ. Geol. — 1983. — **78**, N 4. — P. 573—590.
9. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance // Int. J. Remote Sens. — 1983. — **4**. — P. 273—288.
10. 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. Environ. — 2004. — **94**. — P. 1—16.
11. McCoy R. M., Scott L. F., Hardin P. The spectral response of sagebrush in areas of hydrocarbon production // Proc. of Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology. — Ann Arbor, Michigan: Environmental Research Institute, 1989. — P. 751—756.
12. Milton N. M., Collins W., Chang S.-H., et al. Remote detection of metal anomalies on Pilot Mountain, Randolph County, North Carolina // Econ. Geol. — 1983. — **78**, N 4. — P. 605—615.
13. Noomen M. F. Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage: Ph. D. Dissertation. — International Institute for Geo-International Science and Earth Observation, Enschede, the Netherlands (ITC). — 2007, N 145. — 167 p.
14. 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, Germany, 13–16 May, 2003 / Eds M. Habermeyer, A. Mülle, S. Holzwarth. — Herrsching, 2003. — P. 252–256.
15. *Noomen M. F., Skidmore A. K., van der Meer F. D., et al.* The influence of gas pipeline leakade on plant development and reflectance // ACRS 2004: Proc. of the 25th Asian Conf. on Remote Sensing. — Chiang Mai, Thailand, 2004. — Vol. 1-2. — P. 637–642.
16. *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 Internat. Symp. on Remote Sensing of Environment: Global monitoring for sustainability and security, Saint-Petersburg, 20–24 June, 2005. — Saint-Petersburg, 2005. — 4 p.
17. *Schumacher D.* Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments // AAPG Memoir. — 1996. — N 66. — P. 71–89. — (Hydrocarbon migration and its nearsurface expression / Eds D. Schumacher, M. A. Abrams).
18. *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 Symposium ISPRS “Remote Sensing: From Pixels to Processes”, Enschede, the Netherlands, 8–11 May 2006.
19. *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.

Надійшла до редакції 03.12.10

*V. I. Lyalko, Z. M. Shportyuk, O. N. Sibirtseva,
S. S. Dugin, V. I. Vorobiov*

INVESTIGATION OF VARIANCES FOR RED EDGE INDICES OF WHEAT REFLECTANCE SPECTRA OVER A GAS FIELD

Field spectrometric data were recorded from wheat plots with the FieldSpec® 3FR spectrometer over the Hlibovske gas field (the Crimea) on 27 May 2010. We detected the influence of gas seepage on wheat reflectance spectra using the variances of the red edge position REP and MERIS terrestrial chlorophyll index TCI. We found some decrease in REP and TCI values over the gas field relative to their mean values outside the gas field.