

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

ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНІ ІНДЕКСИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІН РОСЛИННОГО ПОКРИВУ НАД НАФТОВИМ РОДОВИЩЕМ ЗА ДАНИМИ СПЕКТРОМЕТРИЧНОЇ ЗЙОМКИ

Исследован характер изменений вегетационных индексов: позиции красного края REP, мерисовского наземного хлорофильного индекса TCI и модифицированного нормализованного разностного индекса NDVI₇₀₅ по данным спектрометрирования наземного покрова над Приозерным нефтяным месторождением (Крым) спектрометром FieldSpec® 3 FR с целью выявления поискового сигнала.

Для различения точек с растительным покровом использован индекс NDVI₇₀₅, коэффициент корреляции которого с REP $r = 0,87$ для точек со значениями NDVI₇₀₅ $\geq 0,169$.

В точках с растительным покровом над нефтяным месторождением установлено уменьшение значений REP и TCI, кроме точек вблизи нефтяных скважин, в которых наблюдается увеличение значений REP и TCI относительно их средних значений за пределами месторождения. Корреляция между REP и TCI с коэффициентом $r = 0,97$ свидетельствует о возможности TCI вместе с REP реагировать на изменения растительного покрова над месторождением углеводородов и служит таким образом одним из нефтегазопоисковых индексов.

The changes in values of vegetation indices for the red edge position (REP), the MERIS terrestrial chlorophyll index (TCI) and the modified normalized difference vegetation index (NDVI₇₀₅) are investigated using the surface cover spectrometric data over the Pryozerne oil field (Crimea) by Field Spec® 3FR spectrometer to reveal the searching signal.

NDVI₇₀₅ index is used to discriminate the points with the vegetation cover. The correlation between NDVI₇₀₅ and REP are obtained with the $r = 0,87$ for the points where NDVI₇₀₅ $\geq 0,169$.

The points with the vegetation cover over oil field showed the decrease of REP and TCI except for ones near the oil wells where some increase of REP and TCI relative to their mean values outside of the deposit is observed. The correlation between REP and TCI with the $r = 0,97$ indicates the possibility for TCI together with REP respond to the vegetation cover changes over the hydrocarbon field and serves as one of the oil – gas prospecting indices.

Вступ

Аномальні концентрації вуглеводнів у ґрунті, які виникають внаслідок їх просочування з родовищ газу та нафти або витікання з підземних трубопроводів, викликають певні зміни в рослинному покриві Землі. Ці зміни впливають на спектри відбиття рослинності і спричиняють зміни нахилу спектральної кривої в області червоного краю 650–760 нм, що призводить до спектральних зсувів вегетатійного індексу позиції червоного краю REP – довжини хвилі, на якій досягається максимум нахилу спектра відбиття в області червоного краю [7].

Гіперспектральне дистанційне зондування рослинного покриву над родовищами вуглеводнів та нафто-газопроводами може бути використане для виявлення цих змін за допомогою гіперспектральних вегетатійних індексів, визначених в області червоного

краю [2–5, 9–11]. Так, у роботі [10] досліджувався вплив просочування підземного природного газу на позицію червоного краю REP [7] спектрів відбиття рослин, який проявлявся у зменшенні (синій зсув) значення REP внаслідок вегетатійного стресу, спричиненого аномальною концентрацією газу в ґрунті.

Вплив просочування природного газу на спектри відбиття озимої пшениці над газовим родовищем за польовими даними наземної спектрометричної зйомки досліджувався авторами в роботах [2–4], в яких вивчалися варіації індексів червоного краю – REP [7] та мерісівського наземного хлорофільного індексу TCI [5] над Глібовським газовим родовищем. В результаті досліджень було встановлено [2–4], що над газовим родовищем значення REP і TCI для спектрів відбиття озимої пшениці зменшуються порівняно з їх середніми значеннями за межами родовища.

В даній роботі продовжено дослідження характеру змін індексів TCI та REP за даними

спектрометричної зйомки наземного покриття над нафтовим родовищем Приозерне (Крим) спектро радіометром FieldSpec® 3 FR від 7 червня 2011 р. Складність проблеми аналізу змін вегетаційних індексів REP і TCI над нафтовим родовищем Приозерне полягає в наявності просторової неоднорідності в наземному покритті. Для відокремлення точок з рослинним покритвом нами використано ідеї роботи [8]: комбінацію REP і модифікованого нормалізованого вегетаційного індексу $NDVI_{705}$ [6], порогове значення $NDVI_{705}$ та його кореляційний зв'язок із REP для точок з рослинним покритвом з високим коефіцієнтом кореляції. Крім того, нами досліджуються кореляційні зв'язки між REP і TCI з метою виявлення можливості індексу TCI слугувати одним з пошукових індексів при розвідуванні родовищ вуглеводнів.

Варто зауважити, що дослідження поведінки REP над нафтовим родовищем в Китаї для спектрів відбиття ярої пшениці за гіперспектральними даними польової спектрометричної зйомки та аерозйомки наведено в працях [11–13], де встановлено, що мікропросочування вуглеводнів з нафтового родовища діє як удобрювач для росту пшениці і спричиняє збільшення REP до 744 нм проти величини 738 нм на площі, де мікропросочування відсутнє. Значення REP використано також в роботі [9] для визначення місця виливання нафти з трубопроводу та змін рослинного покриття за гіперспектральними даними аерознімання сенсора AVIRIS. Зіставлення значень REP, обчислених для спектрів відбиття рослинності в зоні забруднення нафтопродуктами до аварії і після неї, показало зсуви REP в довгохвильову зону (червоний зсув).

Проведення вимірювань та аналіз даних спектрометрування

Відомо, що більш високі об'єми міграції вуглеводнів з родовищ нафти і газу спостерігаються в зонах розломів, а найбільш активно ці процеси відбуваються над газовими родовищами.

В даній роботі об'єктом досліджень є Приозерне нафтове родовище (рис. 1) [1]. Це родовище розташоване в південно-східній частині Керченського півострова на

відстані 27 км від м. Керч. Поверхневі прояви нафти на Приозерній площі відомі з давніх часів. Посуд з нафтою цього родовища знайдено під час археологічних розкопок давніх міст Притакі та Танаїс. Перша свердловина тут закладена в 1886 р. З того часу на площі з перервами велися пошуки і видобувалася нафта. У 1951–1954 рр. були пробурені нові свердловини і встановлена промислова нафтоносність караганських та чокракських відкладів міоцену. Приозерне підняття має криптодіапірову будову. Вивчена частина його являє собою західну перикліналь брахіантиклінальної складки північно-східного простягання з більш крутим південним крилом. Розміри структури у межах суходолу по ізогіпсі –750 м сягають 1,9 x 0,6 км, висота до 300 м. Режим покладів нафти водонапірний. Родовище тривалій час знаходиться в консервації.

Спектрометрування наземного покриття над нафтовим родовищем Приозерне здійснювалось портативним спектро радіометром FieldSpec® 3 FR (див. сайт www.asdi.com) дистанційно в сонячну погоду 7 червня 2011 р. на двох маршрутах, схеми яких з номерами точок спектрометрування наведено на рис. 1. Значення замірів спектральної яскравості в діапазоні 350–2500 нм конвертувалися у величини коефіцієнтів відбиття, які в подальшому використовувались для досліджень.

Перший маршрут перетинає родовище в напрямку з північного заходу на південний схід і охоплює 13 точок з номерами 567–579. Другий простягається із північного сходу на південь і налічує 17 точок з номерами 580–583 та 585–597. Протяжність першого маршруту приблизно 750 м, а другого – 1350 м.

В кожній точці обчислювались значення вегетаційних індексів з області червоного краю $NDVI_{705}$ [6], REP і TCI [2–4, 5, 7] за такими формулами:

$$NDVI_{705} = \frac{R(750) - R(705)}{R(750) + R(705)}, \quad (1)$$

$$REP = 701 + 41 \frac{(\bar{R} - R(701))}{(R(742) - R(701))}, \quad (2)$$

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

$$TCI = \frac{R(754) - R(708)}{R(708) - R(681)}, \quad (3)$$

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

Наземний покрив над родовищем характеризується просторовою неоднорідністю. Короткий опис наземного покриття у точках спектрометрування наведено в таблиці.

Крім опису наземного покриття, в таблиці подано порогове значення модифікованого нормалізованого різницевого індексу $NDVI_{705}$, яке встановлено на підставі корелятивного зв'язку між REP і $NDVI_{705}$ з високим

коефіцієнтом кореляції для точок з рослинним покривом. Співвідношення величин $NDVI_{705}$ і REP , обчислених за формулами (1), (2) у 29 точках спектрометрування, наведено на рис. 2, А.

Зауважимо, що на графіку не нанесено значення індексів в точці 593 для поверхні води, оскільки в цій точці значення REP перевищують більше ніж на 20 нм значення в інших точках, що характерно для водної поверхні.

Коефіцієнт кореляції між REP і $NDVI_{705}$ обчислений для 17 точок з рослинним покривом за формулою Пірсона:

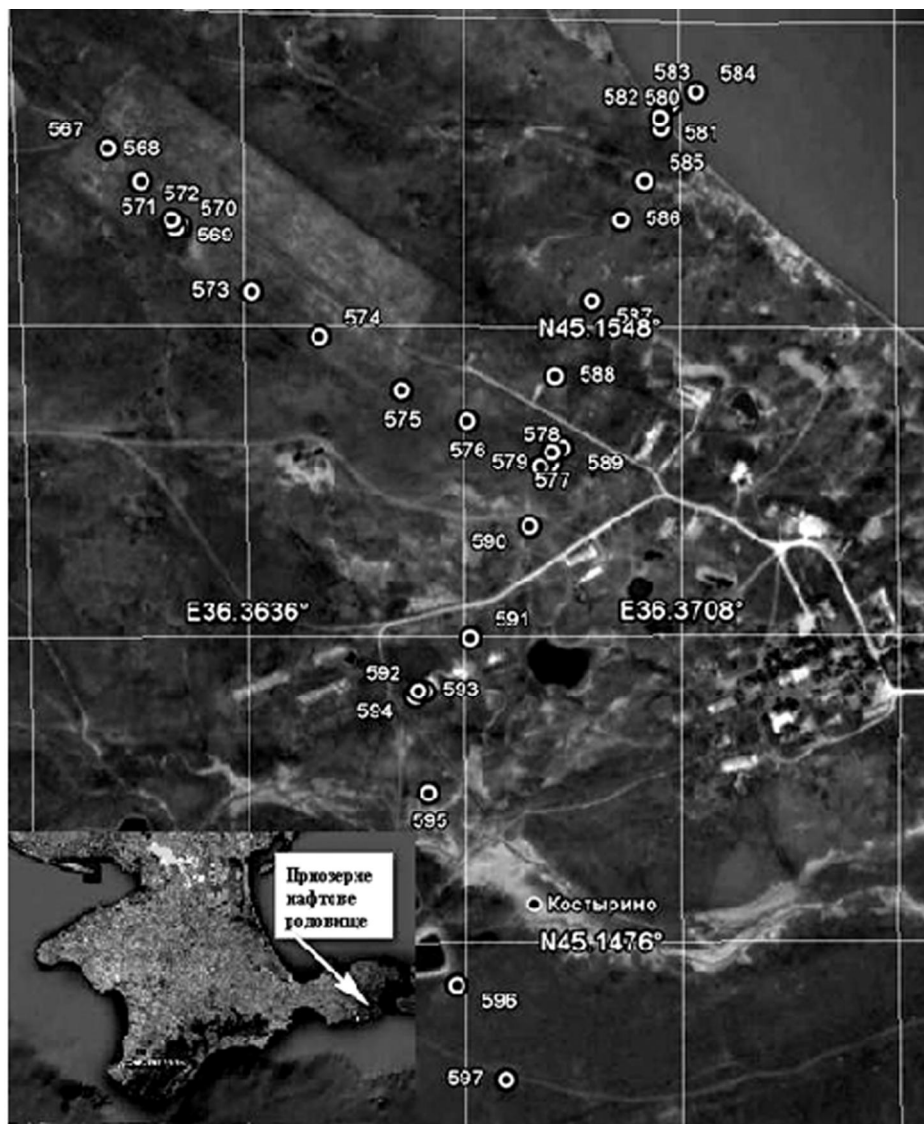


Рис. 1. Схема маршрутів з номерами точок спектрометрування наземного покриття над нафтовим родовищем Приозерне (АР Крим) 7.06.2011 р.

Різновиди наземного покриття в точках спектрометрування над Приозерним нафтовим родовищем

№ п/п	Тип покриття	№ точки спектрометрування	Порогове значення NDVI ₇₀₅
1	Лугова трава над родовищем	568, 569, 573—576, 588—591	NDVI ₇₀₅ ≥ 0,169
2	Лугова трава біля клапана свердловини	577, 595	
3	Червона солончакова рослинність	582	
4	Полин біля свердловини	572	
5	Лугова трава за межами родовища	567, 596, 597	
6	Грунт із зрідженою луговою травою над родовищем	580, 586, 587	NDVI ₇₀₅ < 0,169
7	Сухий грунт	570, 578, 585	
8	Нафтонасичений грунт	571, 579	
9	Бура глина, зволожений суглинок	581, 583	
10	Сухий такирний грунт біля свердловини	594	
11	Каложа біля свердловини з плівкою нафти	592, 593	

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{17} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{17} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{17} (y_i - \bar{y})^2}} = 0,87, \quad (4)$$

де $x_i = REP_i$ та $y_i = (NDVI_{705})_i$ – значення індексів в точці з порядковим номером i ($i = 1, 17$); $\bar{x} = REP = 717,01$ нм та $\bar{y} = NDVI_{705} = 0,2925$ – середні арифметичні значення відповідних індексів.

На рис. 2, А чітко виділено порогове значення індексу $NDVI_{705} = 0,169$, яке відокремлює точки з рослинним покритвом від решти точок. Співвідношення між REP і $NDVI_{705}$, наведене на рис. 2, А, для рослинного покриття над нафтовим родовищем свідчить про те, що REP і TCI забезпечують реальні значення лише на густо зарослих площах із значеннями $NDVI_{705} \geq 0,169$.

З аналізу рис. 2, Б і таблиці різновидів наземного покриття в точках спектрометрування можна зробити висновок про те, що індекси REP і TCI для точок, в яких $NDVI_{705} < 0,169$, є не вірогідними та не інформативними, оскільки це точки без рослинного покриття або з низькохлорофільним покритвом.

Графіки вегетаційних індексів REP і TCI , обчислені за формулами (2), (3) в 17 точках з рослинним покритвом двох маршрутів, наведено на рис. 2, В.

Надалі в тексті при посиланні на номер n точки на рис. 2, Б відповідний номер на

схемі маршрутів зйомки (рис. 1) вказується в дужках. Очевидно, що на рис. 2, Б відстань між точками не відповідає віддалі між ними на місцевості. Згідно з даними обчислень, значення REP змінюються від 713,03 нм в точці 5 (573) до 719,91 нм в точці 16 (596) з трав'яним покритвом. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями дорівнює 6,88 нм. Фонове значення $REP_{фон}$, обчислене як середнє арифметичне значень REP в точках 1 (567), 16 (596) і 17 (597), які знаходяться за межами родовища, становить $REP_{фон} = 718,5$ нм. Різниця між фоновим і мінімальним значеннями REP в точці 5 (573), яка визначає величину синього зсуву, дорівнює 5,17 нм. Характерною особливістю спектрів відбиття рослинного покриття над нафтовим родовищем, на відміну від газового [2–4], є явище червоного зсуву – збільшення REP проти фонового значення в точках 4 (572), 9 (577), 15 (595), які розташовані над родовищем поблизу нафтових свердловин. Величина червоного зсуву незначна і в перших двох точках менше 1 нм, а в точці 15 (595) дорівнює 1,12 нм. Для решти точок над родовищем спостерігається зменшення значень REP – явище синього зсуву.

Згідно з даними обчислень наземного хлорофільного індексу TCI , його значення змінюються від 0,944 в точці 5 (573) до 2,032 в точці 16 (596) (рис. 2, В).

Фонове значення $TCI_{фон}$, обчислене як середнє арифметичне значень TCI для тих

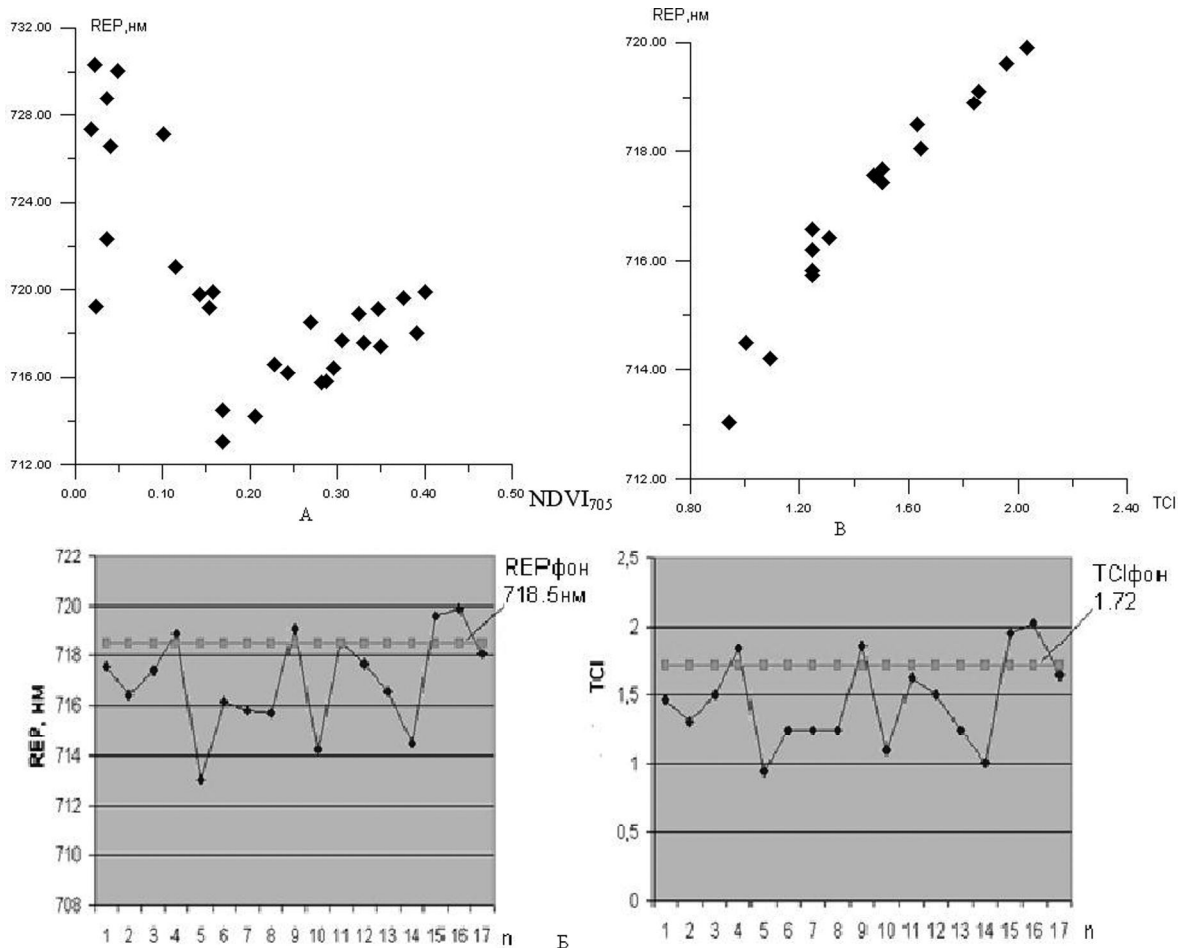


Рис. 2, А. Взаємозв'язок між величинами REP і NDVI₇₀₅ за даними обчислень у 29 точках маршрутів зйомки

Рис. 2, Б. Значення вегетаційних індексів REP і TCI, обчислених за даними спектрометрування у 17 точках n з рослинним покривом на двох маршрутах зйомки 7 червня 2011 р. над Приозерним нафтовим родовищем

Рис. 2, В. Корелятивний зв'язок між величинами REP і TCI ($r = 0,97$) у 17 точках двох маршрутів зйомки із рослинним покривом над Приозерним нафтовим родовищем

же точок, що і $REP_{фон}$, становить $TCI_{фон} = 1,716$. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями дорівнює 1,09; між мінімальним і фоновим – 0,772, а між максимальним і фоновим – 0,316.

Отже, для значень TCI в точках спектрометрування рослинного покриву над родовищем характерним є зменшення значень TCI проти $TCI_{фон}$ у точках над родовищем, окрім точок, розташованих поблизу нафтових свердловин, в яких спостерігається збільшення TCI. Як впливає з наведених вище результатів, обидва індекси REP і TCI для рослинного покриву в точках над нафтовим родовищем мають зменшені значення.

На рис. 2, В показано корелятивну залежність між величинами REP і TCI у 17 точках з рослинним покривом. Коефіцієнт кореляції між REP і TCI для цих точок, обчислений за формулою Пірсона (4), де $x_i = REP_i$ та $y_i = TCI_i$ – значення індексів в точці з порядковим номером i ($i = 1, 17$) на рис. 2, В, $\bar{x} = \overline{REP} = 717,01$ nm та $\bar{y} = \overline{TCI} = 1,458$ – середні арифметичні значення відповідних індексів, дорівнює $r = 0,97$.

Значення коефіцієнта кореляції близьке до 1 вказує на майже лінійну залежність між індексами REP і TCI в точках з рослинним покривом як над нафтовим родовищем, так і за його межами: зменшення TCI щодо фо-

нового в тих точках, в яких спостерігається синій зсув REP, і збільшення TCI в точках поблизу нафтових свердловин, в яких фіксується червоний зсув REP.

В точках з рослинним покривом над нафтовим родовищем встановлено зменшення значень REP (синій зсув до 5 нм) і TCI, окрім точок поблизу нафтових свердловин, в яких спостерігається незначне збільшення значень REP (червоний зсув ≈ 1 нм) і TCI проти їх середніх значень для точок за межами родовища. Висока кореляція між REP і TCI з коефіцієнтом $r = 0,97$ свідчить про можливість як TCI, так і REP реагувати на зміни рослинного покриву над родовищем вуглеводнів і у такий спосіб слугувати одним з нафтогазопошукових індексів.

Така поведінка індексу TCI вказує на його можливість разом з індексом REP реагувати на зміни рослинного покриву над нафтовим родовищем під впливом просочування вуглеводнів, а отже, бути одним з нафтогазопошукових індексів. Варто зазначити, що дослідження поведінки вегетаційного індексу TCI під впливом просочування вуглеводнів та кореляційного зв'язку REP за даними спектрометрування наземного покриву над нафтовим родовищем проведено вперше. Подібна поведінка TCI під впливом просочування природного газу над газовим родовищем описана в працях [2–4].

Висновки

Проведено дослідження змін вегетаційних індексів червоного краю REP і TCI, обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування наземного покриву спектро радіометром FieldSpec® 3 FR над нафтовим родовищем Приозерне та за його межами, з метою виявлення пошукового сигналу.

Через просторову неоднорідність наземного покриву над родовищем для розрізнення та відокремлення точок з рослинним покривом з усієї множини точок спектрометрування досліджено кореляційний зв'язок між індексами REP і NDVI₇₀₅, на підставі якого встановлено високий коефіцієнт кореляції $r = 0,87$ для всіх точок з рослинним покривом, для яких NDVI₇₀₅ $\geq 0,169$. Точки з меншими значеннями NDVI₇₀₅ характерні для нерослинного або

низькохлорофільного рослинного покриву, тому високі значення обох індексів REP і TCI для цих точок не реальні.

В точках з рослинним покривом над нафтовим родовищем встановлено зменшення значень REP (синій зсув до 5 нм) і TCI, окрім точок поблизу нафтових свердловин, в яких спостерігається незначне збільшення значень REP (червоний зсув ≈ 1 нм) і TCI проти їх середніх значень для точок за межами родовища. Висока кореляція між REP і TCI з коефіцієнтом $r = 0,97$ свідчить про можливість як TCI, так і REP реагувати на зміни рослинного покриву над родовищем вуглеводнів і у такий спосіб слугувати одним з нафтогазопошукових індексів.

Наведені результати досліджень вказують на те, що комплексне використання гіперспектральних індексів REP і TCI з області червоного краю можна вважати методом виявлення вегетаційних стресів в місцях аномальних концентрацій вуглеводнів в ґрунті, а ці індекси можуть виступати як нафтогазопошукові.

Список літератури

1. Атлас родовищ нафти і газу України. Південний нафтогазоносний регіон / Гол. ред. М.М. Іванюта. – Львів: Центр Європи, 1998. – Т. 6. – 222 с.
2. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М. та ін. Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем // Косм. наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 6. – С. 5–10.
3. 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 // Там же. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 15–19.
4. Шпортюк З. М., Сибірцева О. М., Дугін С. С. Вплив просочування природного газу на наземний хлорофільний індекс та позицію червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем // Доп. НАН України. – 2011. – № 11. – С. 115–119.
5. Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // Int. J. Remote Sens. – 2004. – Vol. 25. – P. 5403–5413.
6. Gitelson A. & Merzlyak M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn

- senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation // *Journal of Plant Physiology*. – 1994. – Vol. 143. – P. 286–292.
7. *Horler D. N. H., Dockray M. and Barber J.* The red edge of plant leaf reflectance // *Int. J. Remote Sens.* – 1983. – Vol. 4. – P. 273–288.
 8. *Klein, D. Menz, G.* Vegetation Assessment in East Africa using MGVI and Red Edge Position from Envisat MERIS data // *Proc. of the MERIS (A)ATSR Workshop 2005 (ESASP-597)*. 26-30 September 2005. – ESRIN, Frascati, Italy. Editor: H. Lacoste: Published on CDROM, 2005. – P. 44.1.
 9. *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.* – 2005. – Vol. 94. – P. 1–16.
 10. *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. – Vol. – 29. – P. 5687–6008.
 11. *Van der Meer F., van Dijk P., Kroonenberg S. et al.* Hyperspectral hydrocarbon microseepage detection and monitoring: potentials and limitations // 2-nd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy. ITC, Enschede, 11–13 July. – 2000. – P. 8.
 12. *Yang H., Zhang J., van der Meer F. et al.* Spectral characteristics of wheat associated with hydrocarbon microseepages // *Int. J. Remote Sens.* – 1999. – Vol. 20, N 4. – P. 807–813.
 13. *Yang H., Zhang J., van der Meer F. et al.* Imaging spectrometry data correlated to hydrocarbon microseepage // *Int. J. Remote Sens.* – 2000. – Vol. 21, N 1. – P. 197–202.

Наук. центр аерокосм. досліджень Стаття надійшла
 Землі Ін-ту геол. наук НАН України, 08.10.12
 Київ
 E-mail: dstas2389333d@i.ua