

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ ЧЕРВОНОГО КРАЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІН РОСЛИННОГО ПОКРИВУ НАД НАФТОВИМ РОДОВИЩЕМ ЗА ДАНИМИ СПЕКТРОМЕТРИЧНОЇ ЗЙОМКИ

В.І. Лялько¹, З.М. Шпортюк², О.М. Сибірцева³, С.С. Дугін⁴

¹ Державна установа Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: www.casre.kiev.ua
Директор, академік НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державних премій України, член-кореспондент Міжнародної академії астронавтики.

² Державна установа Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: www.casre.kiev.ua
Старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук.

³ Державна установа Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: www.casre.kiev.ua
Молодший науковий співробітник.

⁴ Державна установа Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: www.casre.kiev.ua. Головний приладист.

Досліджено варіації гіперспектральних вегетаційних індексів: позиції червоного краю REP, мерсівського наземного хлорофільного індексу TCI та модифікованого нормалізованого різницевого індексу NDVI₇₀₅ за даними спектрометрування наземного покриття над Приозерним нафтовим родовищем (Крим) спекторадіометром FieldSpec® 3 FR з метою виявлення пошукових індексів. Для точок із рослинним покритвом встановлено обмеження на значення NDVI₇₀₅ $\geq 0,169$, що дозволяє відокремити їх від решти точок у випадку неоднорідного наземного покриття. Над нафтовим родовищем в усіх точках із рослинним покритвом, окрім точок поблизу нафтових свердловин, встановлено зменшення величин усіх досліджуваних індексів щодо їх фонових значень за межами родовища. Сильна кореляція між REP і NDVI₇₀₅ ($r = 0,87$) і між TCI і NDVI₇₀₅ ($r = 0,88$) та зменшення їх значень над родовищем свідчать про потенційну можливість кожного з цих індексів реагувати на зміни рослинного покриття над родовищем вуглеводнів і забезпечувати інформативні в пошукових цілях значення лише на площах із певними обмеженнями на величину NDVI₇₀₅.

Ключові слова: гіперспектральні індекси, рослинний покрив, нафтове родовище, спектрометрична зйомка.

RESEARCH OF HYPERSPECTRAL RED EDGE INDICES FOR VEGETATION COVER CHANGE DETECTION OVER THE OIL FIELD USING SPECTROMETRIC SURVEY DATA

V.I. Lyalko¹, S.M. Shportiuk², O.M. Sibirtseva³, S.S. Dugin⁴

¹ State Institution Scientific Center of Aerospace Research of the Earth of Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, E-mail: www.casre.kiev.ua
Director, academician of NAS of Ukraine, doctor of geological-mineralogical sciences, professor, honoured science and technology worker of Ukraine, laureate of the State prizes of Ukraine, member-correspondent of the International Academy of Astronautics.

² State Institution Scientific Center of Aerospace Research of the Earth of Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, E-mail: www.casre.kiev.ua
Senior research fellow, candidate of physical and mathematical sciences.

© В.І. Лялько, З.М. Шпортюк, О.М. Сибірцева, С.С. Дугін, 2014

- ³ *State Institution Scientific Center of Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, E-mail: www.casre.kiev.ua. Junior researcher.*
- ⁴ *State Institution Scientific Center of Aerospace Research of the Earth of Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, E-mail: www.casre.kiev.ua. Chief engineer of the devices.*

The variations of hyperspectral vegetation indices such as red edge position, MERIS terrestrial chlorophyll (TCI) and modified normalized difference vegetation index (NDVI₇₀₅) using terrestrial cover spectrometry data over the Pryozerne oil field (Crimea) by the spectroradiometer FieldSpec®3 FR to receive the searching indices are studied. As far as the points with the vegetation cover there are the limitation for NDVI₇₀₅ ≥ 0.169 that distinguishes them from the other points in case of heterogeneous terrestrial cover. The lower magnitudes for all indices of interest relative to their background values out of field boundaries are observed for all points with vegetation cover over the oil field excepting the points near the oil boreholes. The strong correlation between REP and NDVI₇₀₅ ($r = 0.87$) as well as TCI and NDVI₇₀₅ ($r = 0.88$) and decreasing their values over the field shows the possibility of every index to respond to the changes of vegetation cover over hydrocarbon fields and give the informative index values in the prospecting goals only for the areas with the proper limitations of NDVI₇₀₅.

Key words: hyperspectral indices, vegetation cover, oil field, spectrometric survey.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ КРАСНОГО КРАЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НАД НЕФТЯНЫМ МЕСТОРОЖДЕНИЕМ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

В.И. Лялько¹, З.М. Шпортюк², А.Н. Сибирцева³, С.С. Дугин⁴

- ¹ *Государственное учреждение Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: www.casre.kiev.ua
Директор, академик НАН Украины, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственных премий Украины, член-корреспондент Международной академии астронавтики.*
- ² *Государственное учреждение Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: www.casre.kiev.ua
Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук.*
- ³ *Государственное учреждение Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: www.casre.kiev.ua
Младший научный сотрудник.*
- ⁴ *Государственное учреждение Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: www.casre.kiev.ua
Главный приборист.*

Исследованы вариации гиперспектральных 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) спектрорадиометром FieldSpec®3 FR с целью выявления поисковых индексов. Для точек с растительным покровом установлено ограничение на значение NDVI₇₀₅ $\geq 0,169$, что позволяет отделить их от остальных точек в случае неоднородного наземного покрова. Над нефтяным месторождением во всех точках с растительным покровом, кроме точек вблизи нефтяных скважин, установлено уменьшение величин всех исследуемых индексов относительно их фоновых значений за пределами месторождения. Сильная корреляция между REP и NDVI₇₀₅ ($r = 0,87$) и между TCI и NDVI₇₀₅ ($r = 0,88$) и уменьшение их значений над месторождением свидетельствуют о потенциальной возможности каждого из этих индексов реагировать на изменения растительного покрова над месторождением углеводородов и обеспечивать информативные значения в поисковых целях только на площадях с определенными ограничениями на величину NDVI₇₀₅.
Ключевые слова: гиперспектральные индексы, растительный покров, нефтяное месторождение, спектрометрическая съемка.

Вступ

Просочування вуглеводнів із родовищ нафти і газу та збільшення їх концентрації в ґрунті викликає певні зміни в наземному рослинному покриві, що впливають на спектри відбиття рослинності. Цей вплив проявляється в зміні кута нахилу спектральної кривої в області червоного краю 650-760 нм, що призводить до спектральних зсувів позиції червоного краю REP – довжини хвилі, на якій досягається максимум нахилу спектра відбиття в області червоного краю [Hogler et al., 1983]. Другим гіперспектральним вегетаційним індексом, який залежить від зміни нахилів спектральної кривої в області червоного краю, реагуючи на зміни вмісту хлорофілу в рослинному покриві, є мерсівський наземний хлорофільний індекс MTCl [Dash et al., 2004], який ми в цьому дослідженні будемо називати TCl. Цей індекс, на відміну від REP [Noomen et al., 2008], не використовувався в нафтогазопошукових цілях методами гіперспектрального дистанційного зондування [Noomen et al., 2008; Van der Meer et al., 2000; Yang et al., 1999; Yang et al., 2000] і вперше досліджувався з цією метою в роботах авторів [Лялько та ін., 2010; Лялько та ін., 2012а; Шпортюк та ін., 2011; Лялько та ін., 2012б].

Зокрема, в публікації [Noomen et al., 2008] вивчався вплив просочування підземного природного газу на позицію червоного краю REP спектрів відбиття рослин, який проявився у зменшенні (синій зсув) величини REP внаслідок вегетаційного стресу, спричиненого аномальною концентрацією газу в ґрунті.

Вплив просочування природного газу на спектри відбиття озимої пшениці над Глібовським газовим родовищем (підземним газосховищем, Крим) досліджено авторами в роботах [Лялько та ін., 2010; Лялько та ін., 2012а; Шпортюк та ін., 2011], в яких вивчалися варіації вегетаційних індексів червоного краю REP та мерсівського наземного хлорофільного індексу TCl за даними спектрометричної зйомки. В результаті досліджень встановлено, що під впливом просочування природного газу величини REP і TCl для спектрів відбиття озимої пшениці над родовищем зменшуються проти середніх значень цих індексів за межами родовища.

В працях [Van der Meer et al., 2000; Yang et al., 1999; Yang et al., 2002] досліджено поведінку індексу REP для спектрів відбиття ярої пшениці над нафтовим родовищем в Китаї за даними польової спектрометричної зйомки та аерозйомки. В результаті було встановлено, що мікропросочування вуглеводнів із нафтового родовища спричиняло збільшення (червоний зсув) REP до 744 нм над родовищем проти значення 738 нм за межами родовища.

В роботі [Лялько та ін., 2012б] авторами досліджувався характер змін індексів TCl та REP за даними спектрометричної зйомки наземного покриву над нафтовим родовищем Приозерне (Крим) спектрорадіометром FieldSpec® 3 FR. В точка з рослинним покривом над нафтовим родовищем встановлено зменшення значень TCl та REP (синій зсув до 5 нм), окрім точок поблизу нафтових свердловин, в яких спостерігається незначне збільшення значень TCl та REP (червоний зсув приблизно 1 нм) проти їх середніх значень для точок за межами родовища.

Зауважимо, що для розрізнення точок із рослинним покривом в публікації [Лялько та ін., 2012б] використано комбінацію двох індексів: REP і модифікованого нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI₇₀₅ [Gitelson, Merzlyak., 1994], порогове значення якого NDVI₇₀₅ ≥ 0,169 дозволило виділити точки з рослинним покривом та високим коефіцієнтом кореляції $r = 0,87$ між REP і NDVI₇₀₅.

Варто відмітити, що використання індексів REP і NDVI у нафтопошукових цілях на площах із розрідженою рослинністю та встановлення порогового значення NDVI для розрізнення пікселів із рослинним покривом за даними сенсора CASI запропоновано в роботі [Li et al., 2012]. В публікації [Klein, Menz, 2005] для оцінювання рослинності за зйомками сенсора Envisat MERIS використано індекси REP та MGVI.

Мета нашого дослідження – підтвердити придатність кожного із вегетаційних індексів TCl і REP для виявлення вегетаційних стресів рослинного покриву в місцях аномальних концентрацій вуглеводнів в ґрунті над родовищами вуглеводнів та слугувати нафтогазопошуковими індексами за даними спектрометричної зйомки. Тому в даній

роботі продовжується дослідження характеру змін індексів TCI, REP, NDVI₇₀₅ та співвідношень між ними за даними спектрометричної зйомки наземного покриття над нафтовим родовищем спектрорадіометром FieldSpec® 3 FR від 7 червня 2011 р. Більше уваги приділено дослідженню можливостей комплексного використання індексів TCI і NDVI₇₀₅ для виділення точок спектрометрування із рослинним покритвом. Варто зазначити, що комплексне використання індексів TCI і NDVI₇₀₅ у нафтогазопошукових цілях за даними спектрометрування неоднорідного наземного покриття над родовищем вуглеводнів досліджується вперше.

Проведення вимірювань та аналіз даних спектрометрування

Приозерне нафтове родовище розташоване в південно-східній частині Керченського півострова в Ленінському районі АР Крим на відстані 27 км від м. Керч [Атлас..., 1998; Лялько та ін., 2012б]. Поверхневі прояви нафти на Приозерній площі відомі з давніх часів. 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 чокрацьких відкладів міоцену. Приозерне підняття має криптодіапірову будову. Вивчена частина його являє собою західну перикліналь брахіантиклінальної складки північно-східного простягання з більш крутим південним крилом. Структура у межах суходолу по ізогіпсі -750 м має розміри 1,9 x 0,6 км, висота її до 300 м. Режим покладів нафти водонапірний. Родовище тривалий час знаходиться в консервації.

Спектрометрування наземного покриття над нафтовим родовищем Приозерне здійснювалось портативним спектрорадіометром FieldSpec® 3 FR (www.asdi.com) дистанційно в сонячну погоду 7 червня 2011 р. на двох маршрутах, схеми яких з номерами точок спектрометрування неоднорідного наземного покриття наведено в роботі [Лялько та ін., 2012б]. В цій же публікації із 29 точок спектрометрування виділено 17 точок із рослинним (переважно трав'яним) покритвом, які задовольняють певним обмеженням на індекси REP і NDVI₇₀₅. Схему розташування точок із рослинним покритвом наведено на рис. 1 та в табл. 1.

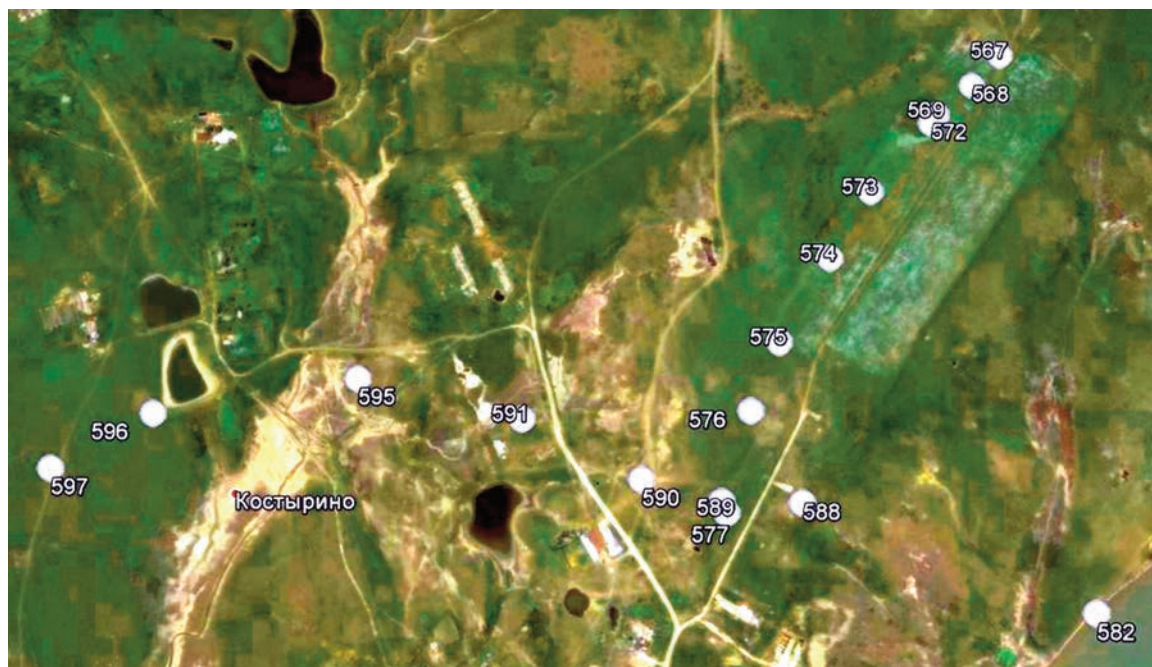


Рис. 1. Схема маршрутів з номерами точок спектрометрування рослинного покриття над нафтовим родовищем Приозерне (АР Крим) 07.06.2011 р.

Fig. 1. Scheme of the routes with the numbers for the spectrometric survey points with vegetation cover over the Priozersk oil field (Crimea), 07.06.2011

Таблиця 1. Порядкові номери точок із рослинним покривом (рис. 3) і відповідні їм номери точок на маршруті зйомки (рис. 1)

Table 1. The sequence numbers for the points with vegetation (Fig. 3) and corresponding to them the points of survey route (Fig. 1)

Порядкові номери точок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Номери точок зйомки	567	568	569	572	573	574	575	576	577	582	588	589	590	591	595	596	597

На першому маршруті із 13 точок спектрометрування виділено дев'ять точок із рослинним покривом з № 567-569 та № 572-577. На другому маршруті із 16 точок виокремлено вісім із № 582, 588-591, 595-597. Причому точки № 567, 596, 597 знаходились за межами нафтового родовища.

Значення замірів спектральної яскравості в діапазоні 350-2500 нм конвертувалися у величини коефіцієнтів відбиття, які в подальшому використовувались для досліджень.

В кожній точці обчислювались значення вегетаційних індексів із області червоного краю $NDVI_{705}$ [Gitelson, Merzlyak., 1994], REP і TCI [Лялько та ін., 2010; Лялько та ін., 2012а; Шпортюк та ін., 2011; Лялько та ін., 2012б; Gitelson, Merzlyak., 1994] за 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 характеризувався просторовою неоднорідністю. Короткий опис наземного покриття у точках спектрометрування подано в публікації [Лялько та ін., 2012б]. Крім опису наземного покриття наведено 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 із рослинним покривом. Співвідношення величин $NDVI_{705}$ і REP , обчислених за формулами (1), (2) у 29 точках спектрометрування,

наведено на рис. 2, А, а співвідношення величин $NDVI_{705}$ і TCI , обчислених за формулами (1), (3) у 29 точках спектрометрування, – на рис. 2, Б.

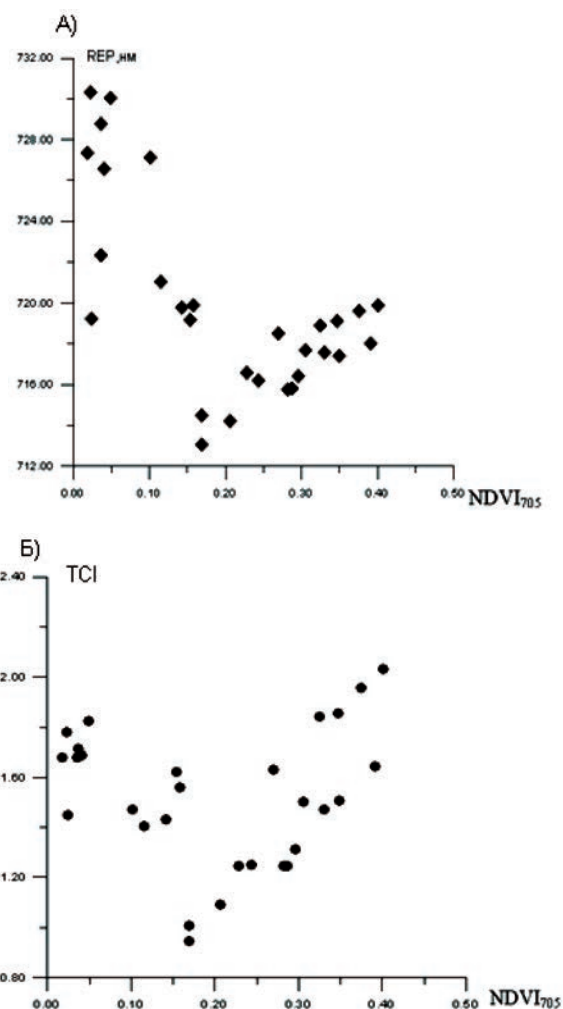


Рис. 2. Взаємозв'язок між величинами: А) REP і $NDVI_{705}$ та Б) TCI і $NDVI_{705}$ за даними обчислень у 29 точках маршрутів

Fig. 2. The relationship between the values of indices: a) REP and $NDVI_{705}$; b) TCI and $NDVI_{705}$ obtained by the processing data for 29 spectrometric survey points

Зіставлення взаємозв'язків між індексами показує (рис. 2), що як на рис. 2, А, так і на рис. 2, Б чітко виділяється порогове значення індексу $NDVI_{705} = 0,169$, яке відокремлює 17 точок із рослинним покривом від решти точок.

Із аналізу рис. 2, А і рис. 2, Б випливає, що індекси REP і TCI для точок, в яких $NDVI_{705} < 0,169$, не є інформативними в нафтогазопозукових цілях, оскільки це точки без рослинності [Лялько та ін., 2012б] або із розрідженим рослинним покривом і низьким вмістом хлорофілу.

На рис. 3 подано графіки залежності вегетаційних індексів REP і TCI від $NDVI_{705}$ для 17 точок із рослинним покривом, для яких $NDVI_{705} \geq 0,169$. В табл. 1 наведено порядкові номери точок на рис. 3 і відповідні їм номери на схемі маршрутів зйомки (рис. 1).

На рис. 3 видно, що мінімальні значення усіх трьох вегетаційних індексів зафіксовані над нафтовим родовищем в точках 5 і 11 (відповідно № 573 і 591 на рис. 1). Точки 1, 16 і 17

знаходяться за межами родовища, тому фонові значення для всіх індексів обчислено як середньоарифметичні у цих точках. Для зіставлення в табл. 2 подано фонові, мінімальні та середньоарифметичні значення вегетаційних індексів REP, TCI, $NDVI_{705}$ для 17 точок із рослинним покривом та різниці між фоновими та мінімальними значеннями.

Із табл. 2 випливає, що фонові значення всіх індексів більші, ніж їх середньоарифметичні значення. На рис. 3, як і в публікації [Лялько та ін., 2012б], видно, що в 14 точках спектрометрування над нафтовим родовищем значення вегетаційних індексів REP і TCI нижчі, ніж фонові для 11 точок і лише в трьох точках з № 4, 9, 15 їх незначно перевищують. Причому найбільше перевищення фонових значень для усіх індексів досягається в точці 15 (№ 595) і становить для REP 1,12 нм (червоний зсув), для TCI – 0,24, а для $NDVI_{705}$ заледве 0,001. Зауважимо, що значення вегетаційних індексів у точці 15 на рис. 3 дуже близькі до їх значень

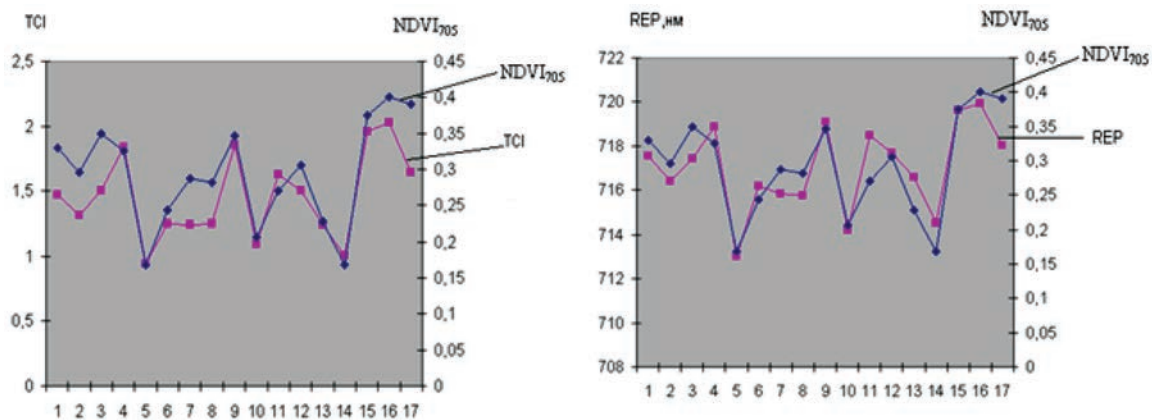


Рис. 3. Значення вегетаційних індексів TCI і $NDVI_{705}$ та REP і $NDVI_{705}$ у 17 точках спектрометрування із рослинним покривом над Приозерним нафтовим родовищем, для яких $NDVI_{705} \geq 0,169$

Fig. 3. The vegetation indices values for TCI and $NDVI_{705}$ and as well REP and $NDVI_{705}$ for 17 spectrometric survey points with vegetation cover over the Priozerne oil field (Crimea), where $NDVI_{705} \geq 0,169$

Таблиця 2. Фонові, мінімальні та середньоарифметичні значення вегетаційних індексів для точок із рослинним покривом

Table 2. Background, minimum and average values of vegetation indices for points with vegetation

Індекси	REP, нм	TCI	$NDVI_{705}$	Кількість точок
Фонові значення індексів	718,5	1,72	0,374	3
Мінімальні значення	713,03	0,94	0,169	2
Різниця між фоновими та мінімальними значеннями	5,47	0,78	0,205	–
Середньоарифметичні значення	717,01	1,46	0,292	17

за межами родовища. Точки 4 (№ 572) і 9 (№ 577), які розташовані поблизу свердловин, характеризуються тим, що в них, на відміну від точки 15, значення індексу $NDVI_{705}$ нижчі за фонові, різниці в обох точках не перевищують 0,049. Щодо значень індексів REP і TCI, то вони вищі, ніж відповідні фонові значення з меншими, ніж для точки 15, різницями: для REP величини різниць не перевищують 0,61 нм, а для TCI – 0,14.

За даними табл. 2 величина синього зсуву, яка дорівнює різниці між фоновим та мінімальним значеннями REP, становить 5,47 нм і досягається у двох точках над родовищем. Зауважимо, що значення вегетаційних індексів у точці 15 на рис. 3 дуже близькі до їх значень за межами родовища, хоча точка 15 (№ 595) знаходиться на значній відстані від точки 16 (№ 596) за межами родовища.

На рис. 4 наведено графіки корелятивної залежності індексів REP і TCI від $NDVI_{705}$ для 17 точок із рослинним покривом та коефіцієнти кореляції між ними, величини яких підтверджують майже лінійну залежність між названими індексами.

Коефіцієнти кореляції між REP і $NDVI_{705}$ та між TCI і $NDVI_{705}$ обчислено для 17 точок із рослинним покривом за формулою Пірсона:

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

де $x_i = (NDVI_{705})_i$, $y_i = REP_i$ або $y_i = TCI_i$; i – значення відповідних індексів у точці з порядковим номером i ($i = 1, \dots, 17$), а $\bar{x} = \overline{NDVI_{705}} = 0,292$, $\bar{y} = \overline{REP} = 717,01$ нм, або $\bar{y} = \overline{TCI} = 1,46$ – середні арифметичні значення відповідних індексів. За даними обчислень коефіцієнтів кореляції між REP і $NDVI_{705}$ та між TCI і $NDVI_{705}$, $r(NDVI_{705}, REP) = 0,87$, а $r(NDVI_{705}, TCI) = 0,88$. Співвідношення між індексами, подані на рис. 3 для точок із рослинним покривом над нафтовим родовищем, та вище наведені коефіцієнти кореляції свідчать про те, що як REP, так і TCI забезпечують інформативні в нафтогазопошукових цілях значення лише на площах із певною густиною рослинності, для яких за даними спектрометрування $NDVI_{705} \geq 0,169$.

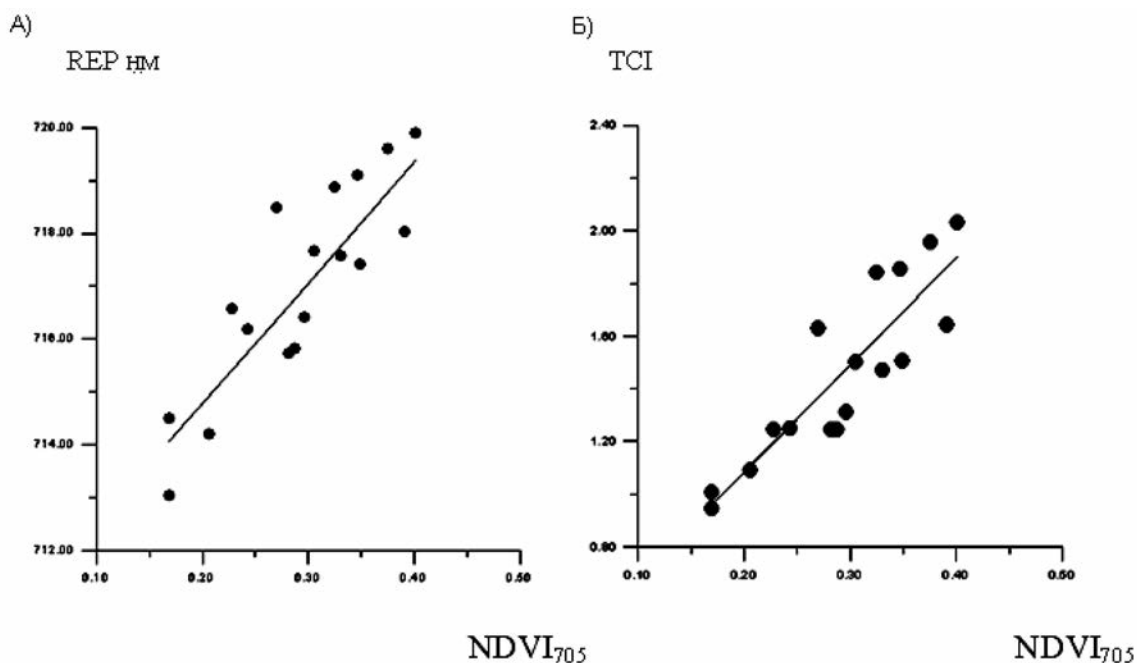


Рис. 4. Корелятивний зв'язок між величинами: А) REP і $NDVI_{705}$ ($r = 0,87$) та Б) TCI і $NDVI_{705}$ ($r = 0,88$) у 17 точках спектрометрування із рослинним покривом над Приозерним нафтовим родовищем

Fig. 4. Correlative relationship between values: a) REP and $NDVI_{705}$ ($r = 0,87$); b) TCI and $NDVI_{705}$ ($r = 0,88$) at 17 spectrometric survey points with vegetation cover over the Priozerne oil field

Аналіз взаємозв'язків між величинами REP і NDVI₇₀₅ та між TCI і NDVI₇₀₅ (рис. 3, 4) і обчислених за формулою (4) коефіцієнтів кореляції свідчить про майже лінійну залежність між індексом NDVI₇₀₅ та індексами TCI і REP в точках із рослинним покривом, для яких виконується обмеження: **NDVI₇₀₅ ≥ 0,169**. Для цих точок коефіцієнт кореляції між NDVI₇₀₅ і TCI $r(\text{NDVI}_{705}, \text{TCI}) = 0,88$, незначно перевищує коефіцієнт кореляції між NDVI₇₀₅ і REP: **$r(\text{NDVI}_{705}, \text{REP}) = 0,87$** . Це свідчить про потенційну можливість незалежного використання індексу TCI як нафтогазопошукового за даними як наземного, так й аерокосмічного знімання. Для оцінювання корелятивної залежності між індексами на рис. 4 використано лінійну регресію, рівняння якої мають вигляд (рис. 4):

$$\begin{aligned} \text{REP} &= 710,05 + 23,77 \text{NDVI}_{705} \text{ (нм)}; \\ \text{TCI} &= 0,272 + 4,05 \text{NDVI}_{705}. \end{aligned}$$

Висновки

На підставі дослідження вегетаційних індексів червоного краю REP, TCI і NDVI₇₀₅, обчислених за даними спектрометрування наземного покриву над Приозерним нафтовим родовищем спекторадіометром FieldSpec® 3 FR, встановлено зменшення величин всіх трьох індексів у 14 точках із рослинним покривом щодо їх фонових значень за межами родовища, окрім трьох точок поблизу нафтових свердловин, в яких спостерігається

незначне збільшення: червоний зсув REP дорівнює приблизно 1,12 нм. Зокрема, в точках із мінімальними значеннями індексів зафіксовано синій зсув REP до 5,47 нм, зменшення TCI від 1,78 до 0,94 та NDVI₇₀₅ від 0,314 до 0,169.

Для розрізнення точок із рослинним покривом використано обмеження NDVI₇₀₅ ≥ 0,169, що дозволяє відокремити їх від решти у випадку неоднорідного наземного покриву. Для 17 точок, які задовольняють наведеному вище обмеженню, встановлено сильну кореляцію: між REP і NDVI₇₀₅ із коефіцієнтом $r = 0,87$, між TCI і NDVI₇₀₅ із коефіцієнтом $r = 0,88$. Для оцінювання корелятивної залежності між індексами використано лінійну регресію, рівняння якої мають вигляд (рис. 4):

$$\begin{aligned} \text{REP} &= 710,05 + 23,77 \text{NDVI}_{705}; \\ \text{TCI} &= 0,272 + 4,65 \text{NDVI}_{705}. \end{aligned}$$

Сильна кореляція між REP і NDVI₇₀₅ та між TCI і NDVI₇₀₅ для точок із рослинним покривом та зменшення їх значень в точках, розташованих над родовищем, свідчать про придатність кожного з індексів TCI та REP реагувати на зміни в рослинному покриві над родовищем вуглеводнів і забезпечувати інформативні в пошукових цілях значення на площах із певною густиною рослинності, що визначено обмеженням на величину індексу NDVI₇₀₅, і у такий спосіб слугувати нафтогазопошуковими індексами.

Список літератури / References

1. Атлас родовищ нафти і газу України. Південний нафтогазоносний регіон / гол. ред. М.М. Іванюта. Львів: Центр Європи, 1998. Т. 6. 222 с.

The Atlas of gas and oil fields of Ukraine. The southern oil-gas region, 1998 / Editor-in-chief M.M. Ivanyuta. Lviv: Tsentr Europey, vol. 6, p. 222 (in Ukrainian).

2. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., Дугін С.С., Воробйов А.І. Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем. *Космічна наука і технологія*. 2010. Т. 16, № 6. С. 5-10.

Lyalko V.I., Shportiuk Z.M., Sibirtseva O.M., Dugin S.S., Vorobiov A.I., 2010. Investigation of variances for red edge indices of wheat reflectance spectra over a gas field. Kosmichna nauka i tehnologiya, vol. 16, № 6, p. 5-10 (in Ukrainian).

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

вегетаційних індексів для пшениці над газовим родовищем (підземним газосховищем) за даними гіперспектральної зйомки. *Космічна наука і технологія*. 2012а. Т. 18, № 2. С. 15-19.

Lyalko V.I., Shportiuk Z.M., Sibirtseva O.M., Dugin S.S., Vorobiov A.I., 2012a. An investigation of changes in vegetation indices for wheat over a gas field (underground gas storage facility) on the basis of hyperspectral data. Kosmichna nauka i tehnologiya, vol. 18, № 2, p. 15-19 (in Ukrainian).

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.

Lyalko V.I., Shportiuk Z.M., Sibirtseva O.M., Dugin S.S., 2011. The influence of natural gas seepage on the terrestrial chlorophyll index and the red edge position of wheat reflectance spectra over the gas field. Dopovidi NAN Ukrainy, № 11, p. 111-119 (in Ukrainian).

5. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., Дугін С.С., Кічка О.А. Гіперспектральні індекси для визначення змін рослинного покриву над нафтовим родовищем за даними спектрометричної зйомки. *Геол. журн.* 2012б. № 4 (341). С. 79-85.

Lyalko V.I., Shportiuk Z.M., Sibirtseva O.M., Dugin S.S., Kichka O.A., 2012б. Hyperspectral indices for detecting vegetation cover changes over the oil field using spectrometric survey data. *Geologichnyy zhurnal*, № 4 (341), p. 79-85 (in Ukrainian).

6. Dash J., Curran P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens.* 2004. № 25. P. 5403-5413.

Dash J., Curran P.J., 2004. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens.*, № 25, p. 5403-5413 (in English).

7. 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.

Gitelson A. & Merzlyak M.N., 1994. 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*, vol. 143, p. 286-292 (in English).

8. Horler D.N.H., Dockray M., and Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens.* 1983. № 4. P. 273-288.

Horler D.N.H., Dockray M., and Barber J., 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens.*, № 4, p. 273-288 (in English).

9. 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. Ed. H. Lacoste. Published on CDROM, 2005. P. 44. 1.

Klein, D., Menz, G., 2005. 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. Ed. H. Lacoste. Published on CDROM, p. 44. 1 (in English).

10. Li Q., Chen X., Lin X., Mao B., Ni G. Study on oil and gas exploration in sparse vegetation areas by hyperspectral remote sensing data. *Chinese Optics Letters*. 2012. № 4. S 11. 4.1-4.3.

Li Q., Chen X., Lin X., Mao B., Ni G., 2012. Study on oil and gas exploration in sparse vegetation areas by hyperspectral remote sensing data. *Chinese Optics Letters*, № 4, S 11. 4.1-4.3 (in English).

11. 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. 5687-6008.

Noomen M.F., Smith K.L., Steven M.D. et al., 2008. Hyperspectral indices for detecting changes in canopy reflectance as a result of underground natural gas leakage. *Int. J. Remote Sens.*, № 29, p. 5687-6008 (in English).

12. 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.

Van der Meer F., van Dijk P., Kroonenberg S. et al., 2000. Hyperspectral hydrocarbon microseepage detection and monitoring: potentials and limitations. *2-nd EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy*. ITC, Enschede, 11-13 July 2000, p. 8 (in English).

13. Yang H., Zhang J., Van der Meer F. et al. Spectral characteristics of wheat associated with hydrocarbon microseepage. *Int. J. Remote Sens.* 1999. Vol. 20, № 4. P. 807-813.

Yang H., Zhang J., Van der Meer F. et al., 1999. Spectral characteristics of wheat associated with hydrocarbon microseepage. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 20, № 4, p. 807-813 (in English).

14. Yang H., Zhang J., Van der Meer F. et al. Imaging spectrometry data correlated to hydrocarbon microseepage. *Int. J. Remote Sens.* 2000. Vol. 21, № 1. P. 197-202.

Yang H., Zhang J., Van der Meer F. et al., 2000. Imaging spectrometry data correlated to hydrocarbon microseepage. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 21, № 1, p. 197-202 (in English).

Стаття надійшла
31.03.2014