

УДК 528.8: 528.7: 528.71: 528.4: 528.06

С.І. АЛЬПЕРТ*

НОВІТНІЙ ПІДХІД ДО ЗАСТОСУВАННЯ НОРМАЛІЗОВАНОГО ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ВЕГЕТАЦІЙНОГО ІНДЕКСУ ДЛЯ КЛАСИФІКУВАННЯ АЕРОКОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА НАЯВНОСТІ НЕПОВНИХ ТА НЕТОЧНИХ ДАНИХ

*Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, м. Київ, Україна; Національний авіаційний університет, факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій, м. Київ, Україна

Анотація. Розв'язання численних наукових, екологічних та сільськогосподарських задач із використанням аерокосмічних зображень включає в себе процедуру класифікування. Класифікування є однією із найбільш важливих процедур. На даний час багато методів контрольованого та неконтрольованого класифікування застосовується в дистанційному зондуванні Землі. Найбільш точні результати отримуються з використанням контрольованих методів класифікування. У цій статті були запропоновані деякі нові підходи до класифікування зображень, засновані на методах контрольованого класифікування та нормалізованому диференційному вегетаційному індексі (NDVI). Зазначено, що різні значення NDVI відповідають різним класам об'єктів, таким як ґрунт, вода, дороги, пісок, зелена рослинність, розливи нафти. Застосування вегетаційного індексу є першим кроком класифікування. Використовуючи NDVI, можна обирати певні класи, які нам потрібні. Після застосування NDVI можуть бути використані такі методи класифікування, як метод паралелепіпедів, правило Демпстера і правило комбінування Інагакі. У статті описані основні переваги цих методів класифікування. Було зауважено, що метод паралелепіпедів дозволяє легко та швидко обробляти дані. Показано, що правило комбінування Демпстера та правило комбінування Інагакі можуть працювати з неточними та неповними даними з різних спектральних каналів. Також зазначалося, що ці методи можуть обробляти суперечливу інформацію. Теорія Демпстера-Шейфера характеризується високою точністю та простотою розрахунків. Було розглянуто числовий приклад, в якому для виявлення та картування розливів нафти використовувалися NDVI та правило комбінування Інагакі. Застосування вегетаційного індексу та таких правил контрольованого класифікування, як метод паралелепіпедів, правило Демпстера, правило комбінування Інагакі, може використовуватися в екологічному моніторингу, картуванні розливів нафти та для вирішення сільськогосподарських завдань.

Ключові слова: класифікування зображень, нормалізований диференційний вегетаційний індекс, метод паралелепіпедів, правило Демпстера, правило комбінування Інагакі, екологічний моніторинг.

Abstract. Solution of different scientific, ecological and agricultural tasks with the use of aerospace images comprises a procedure of image classification. Classification is one of the most important procedures. Nowadays many supervised and unsupervised classification methods are applied in remote sensing. The most accurate results are obtained through the use of supervised classification methods. In this paper, there are proposed some new approaches to image classification which are based on supervised classification methods and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Different values of NDVI are noted to correspond to different classes of objects, such as soil, water, roads, sand, green vegetation, oil spills. Application of Vegetation Index is the first step of classification. Using NDVI, it is possible to select special necessary classes. After the application of NDVI, such classification methods as the parallelepiped method, Dempster's rule, and Inagaki's combination rule can be used. The current work describes the main advantages of these classification methods. It has been noted that the use of the parallelepiped method allows easy and quick processing of data. The paper also shows that Dempster's

combination rule and Inagaki's combination rule can deal with inaccurate and incomplete data from different spectral bands. Moreover, these methods can process conflicting information. Dempster-Shafer theory has the advantage of high accuracy and simple calculations. In the paper, there is also considered a numerical example where NDVI and Inagaki's combination rule has been used for detection and mapping of oil spills. Application of Vegetation Index and such supervised classification rules as the parallelepiped method, Dempster's rule, Inagaki's combination rule can be applied in ecological monitoring, mapping of petroleum spills, and solving agricultural tasks.

Keywords: image classification, Normalized Difference Vegetation Index, parallelepiped method, Dempster's rule, Inagaki's combination rule, ecological monitoring.

DOI: 10.34121/1028-9763-2022-2-19-28

1. Вступ

Як відомо, розв'язання численних природно-ресурсних, сільськогосподарських та екологічних задач із використанням методів та засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) досить часто потребує процедури класифікування. Процедура класифікування є однією з найбільш складних процедур для обробки знімків, які отримуються з використанням як і супутників, так і безпілотних літальних апаратів (БПЛА). При цьому для проведення класифікування територій та складання карт місцевості застосовують різноманітні вегетаційні індекси, а саме: нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI), вдосконалений вегетаційний індекс (EVI), зелений нормалізований диференційний вегетаційний індекс (GNDVI), вегетаційний індекс хлорофілу (CVI) тощо, різні методи контрольованого та неконтрольованого класифікування [1].

У даній статті буде запропоновано використовувати нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) як додатковий етап для проведення процедури класифікування місцевості та складання карт різних типів ландшафтів [2]. Буде показано, як можна скомбінувати використання вегетаційного індексу та методів контрольованого класифікування як метод паралелепіпедів, метод Демпстера-Шейфера та правило Інагакі. Індекс NDVI ще на перших етапах процедури класифікування дає змогу відібрати потрібні класи об'єктів, які нас цікавлять, та відкинути ті класи, що нам не потрібні для розв'язання задачі. Це дає змогу відкинути зайві дані, чим скоротити об'єм обчислень та підвищити точність класифікування, тобто зменшити кількість невірно класифікованих пікселів на знімку. На наступному етапі буде запропоновано застосовувати методи контрольованого класифікування. У роботі будуть окреслені основні переваги та недоліки методу паралелепіпедів і запропоновано використовувати метод Демпстера-Шейфера та правило Інагакі за наявності неповних та неточних даних, отриманих із різних джерел інформації. Також буде наведено і проаналізовано числовий приклад використання правила Інагакі.

Метою даної статті є опис новітнього підходу до застосування нормалізованого диференційного вегетаційного індексу для проведення класифікування аерокосмічних зображень за наявністю неповної, неточної та суперечливої інформації.

2. Нормалізований диференційний вегетаційний індекс та сфери його застосування

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index) NDVI застосовується для розв'язання задач, що ґрунтуються на використанні кількісних оцінок рослинного покриву, тобто, іншими словами, індекс NDVI є кількісним показником кількості фотосинтетичної активної біомаси.

Як відомо, фізіологічний стан рослинного покриву переважно визначається вмістом хлорофілу та рівнем вологозабезпеченості. Тому слід застосовувати відносні показники стану рослинності на основі спектральних індексів, які пов'язані з рівнем хлорофілу та вологості у рослинах.

Вегетаційний індекс NDVI розраховують як різницю інтенсивностей відбитого світла у видимому та інфрачервоному діапазоні, поділену на суму їх інтенсивностей, і яка обчислюється за такою формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

де *NIR* – відбиття у ближній інфрачервоній області спектра;

RED – відбиття у червоній області спектра.

Розрахунок NDVI базується на двох найбільш стабільних ділянках спектральної кривої відображення судинних рослин. При цьому у червоній області спектра (0,4–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом, а в інфрачервоній області (0,7–1,0 мкм) лежить максимум відображення клітинних структур листа.

Слід зауважити, що висока фотосинтетична активність є показником густої рослинності й веде до меншого відображення в червоній області спектра і до більшого в інфрачервоній. Індекс NDVI дозволяє чітко розпізнавати, аналізувати та відокремлювати рослинні об'єкти від інших об'єктів, які знаходяться у навколишньому середовищі. У формулі (1) використовується нормалізована різниця між інтенсивністю відбитого світла у видимому та інфрачервоному діапазоні для того, щоб зменшити вплив відмінностей в освітленні знімку та поглинанні радіації атмосферою. При цьому природні об'єкти, які не пов'язані з рослинністю, характеризуються фіксованим значенням NDVI, що, у свою чергу, дозволяє використовувати даний вегетаційний індекс для їх ідентифікації.

Відносний вегетаційний індекс NDVI приймає значення від -1 до 1 у відсотках або у діапазоні від 0 до 200 (-100...+100). Об'єкти, що не мають відношення до рослинності, приймають фіксовані значення.

У залежності від об'єктів земної поверхні індекс NDVI приймає такі значення:

- 1) від'ємні значення – для водних об'єктів;
- 2) додатні та близькі до нуля значення – для ґрунтів та сухої рослинності;
- 3) максимальні значення – для вегетуючої рослинності;
- 4) проміжні значення – для різноманітних станів рослинного покриву.

Значення NDVI зростають із розвитком зеленої біомаси та зменшуються з її всиханням. Для розрахунку NDVI, як правило, застосовуються та аналізуються серії різночасових знімків із певною періодичністю, що дає змогу отримувати динамічну картину процесу зміни границь та основних характеристик різних типів рослинності. Тобто різночасові знімки дозволяють фіксувати та аналізувати місячні, сезонні та річні варіації стану рослинного покриву і робити прогностичні оцінки [2–3].

Також слід зауважити, що індекс NDVI широко застосовується у сільському господарстві для виконання таких завдань:

- 1) картографування рослинного покриву;
- 2) оцінка продуктивності екосистем і сільськогосподарських територій;
- 3) спостереження за розвитком сільськогосподарських посівів протягом певного вегетаційного періоду;
- 4) моніторинг посухи;
- 5) контроль фаз вегетації;
- 6) розрахунок вологовмісту ґрунтів.

При цьому головною перевагою NDVI є достатньо легкі розрахунки та відсутність потреби у додаткових даних, крім даних дистанційного зондування та параметрів зйомки. Також вегетаційний індекс NDVI може бути розрахований на основі довільних аерокосмічних знімків, які мають спектральні канали у червоному і ближньому інфрачервоному діапазоні.

Вегетаційний індекс NDVI, крім сільського господарства, широко застосовується для вирішення численних природно-ресурсних завдань та задач екологічного моніторингу. Так, можна простежити чітку кореляцію між показником NDVI та продуктивністю для різних типів систем, таких як тундра, лісотундра, луки, пустеля, сільськогосподарські землі, хвойно-широколистяні ліси, листяні ліси та ін. Для кожного типу екосистеми індекс NDVI приймає певне значення. Так, для тундри та пустелі NDVI приймає найменші значення ($NDVI < 0,2$), для хвойно-широколистяних лісів та листяних лісів найбільші значення ($NDVI \geq 0,8$). Дана властивість широко використовується для регіонального картування та аналізу різних типів ландшафтів, оцінки ресурсів та площ біосистем. Однак розрахунок NDVI з метою визначення еколого-кліматичних характеристик рослинності має відбуватися з урахуванням серії різносезонних знімків [3].

Існує значна кореляція між вегетаційним індексом NDVI та такими параметрами, а саме:

- 1) обсягом опадів;
- 2) вологістю та мінеральною (органічною) насиченістю ґрунту;
- 3) потужністю та характеристиками снігового покриву;
- 4) біомасою.

Дані кореляційні зв'язки між індексом NDVI та переліченими параметрами використовуються для розв'язання численних сільськогосподарських та природно-ресурсних завдань.

При цьому залежність між даними параметрами та індексом NDVI, як правило, не пряма і пов'язана з особливостями території, яка досліджується, її кліматичними та екологічними характеристиками.

Завдяки всім цим особливостям, карти NDVI часто використовуються як один із додаткових етапів для проведення більш складних типів аналізу, а саме: класифікування сільськогосподарських земель та лісів, вивчення урбанізованих територій, складання карт різних типів ландшафтів, карт продуктивності лісів і сільськогосподарських земель, карт рослинності природних зон, карт різних типів ландшафтів, створення ґрунтових, фіто-гідрологічних та інших еколого-кліматичних карт. Із використанням вегетаційного індексу можна розв'язувати численні природно-ресурсні та екологічні задачі, а саме: отримувати необхідні дані для прогнозування врожайності у сільському господарстві, проводити аналіз біологічного різноманіття лісів, проводити оцінку збитків від стихійних лих тощо.

3. Процедура класифікування з використанням індексу NDVI за наявності неповної та неточної інформації

Як відомо, розв'язання багатьох природно-ресурсних задач із використанням методів ДЗЗ базується на застосуванні вхідних даних, які надходять від різних спектральних каналів. Тому основною залишається задача розробки методів класифікування зображень, отриманих за допомогою супутників чи БПЛА, які базуються на комбінуванні інформації, отриманої від різних джерел. Тому у даному пункті розглянемо процедуру класифікування, що базується на використанні вегетаційного індексу NDVI, який дозволяє відібрати з усіх класів, що розглядаються на даній території, тільки ті класи, які нам потрібні, та відкинути ті класи об'єктів, що нас не цікавлять, тим самим спрощуючи процедуру класифікування, зменшити об'єм даних та спростити обчислення.

Розглянемо запропонований алгоритм класифікування на такому прикладі. Припустимо, маємо територію, на якій присутні такі класи: зелена рослинність, техногенні об'єкти, відкритий ґрунт, пісок, дороги, розливи нафти на ґрунті, вода. Нашою задачею є визначення території, де відбувся розлив нафти, тобто виявлення та картування розливів нафти з метою проведення екологічного моніторингу досліджуваної території [3, 4].

Процедура класифікування складається з таких кроків [5–8]:

- 1) відбір найбільш інформативних знімків, отриманих із використанням БПЛА;
- 2) попередня обробка знімків;
- 3) виділення нафтозабруднень;
- 4) проведення аналізу серії різночасових знімків;
- 5) складання карт нафтозабруднень.

На першому кроці здійснюється підбір архівних знімків або проводиться замовлення оперативної зйомки території, що досліджується, після чого проводяться стандартні процедури попередньої обробки знімків.

На другому кроці проводиться виділення нафтозабруднень за допомогою наступного алгоритму, який заснований на використанні методів класифікування з навчанням:

1) спочатку для вихідного зображення розраховується вегетаційний індекс NDVI. Враховуємо, що значенням індексу NDVI від 0,2 до 0,8 відповідає зелена рослинність, значенням від -0,3 до 0,2 відповідають техногенні об'єкти, відкритий ґрунт, пісок та дороги, значенням, меншим за -0,3, відповідають водні об'єкти. Відомо, що розливи нафти на ґрунті відповідають діапазону індексу NDVI від -0,25 до 0,15;

2) для вихідного знімку формується маска на основі розрахованих значень індексу NDVI, що дає змогу виключити з подальшого аналізу всі області на знімку, для яких значення індексу NDVI знаходяться поза діапазоном [-0,25; 0,15]. Зокрема, дана процедура дозволяє виключити області лісу, трави, чагарнику та водойми.

Після проведення даної процедури об'єкти, що залишилися на знімку, можна розділити вже на менше число класів. У даному випадку можна виділити 3 класи: розливи нафти на ґрунті, забудови та дороги, неглибокі заболочені водойми;

3) далі експертом на основі польових досліджень чи топографічних карт формуються навчальні вибірки для проведення контрольованого класифікування. При цьому слід виділяти не менше 5-ти навчальних вибірок на знімку для кожного класу таким чином, щоб кожному класу відповідало не менше 1000 пікселів знімка для отримання більш точних результатів класифікування;

4) після виділення навчальних вибірок проводиться процедура контрольованого класифікування зображення, маскованого за індексом NDVI. Для проведення класифікування можна застосувати метод паралелепіпедів. Наведемо його основні положення.

Метод паралелепіпедів

Метод паралелепіпедів заснований на статистичних показниках навчальної вибірки для K спектральних діапазонів [9–10]. Даний алгоритм застосовується, якщо області значень спектральної яскравості об'єктів не перетинаються.

При цьому для кожного класу l та спектрального діапазону k обчислюється середнє значення яскравості в навчальній виборці l_{ik} [10–11]. Далі для класифікування пікселів використовують таке правило. Піксель належить класу l тоді і тільки тоді, якщо його яскравість BV_{ijk} задовольняє умові

$$\mu_{lk} - 2\delta_{lk} \leq BV_{ijk} \leq \mu_{lk} + 2\delta_{lk}, \quad (2)$$

де $l = 1, 2, 3, \dots, L$ – клас, $k = 1, 2, 3, \dots, K$ – спектральний діапазон (спектральний канал).

Якщо позначити нижню та верхню границі цієї нерівності як [10–11]:

$$L_{lk} = \mu_{lk} - 2\delta_{lk}, \quad (3)$$

$$H_{lk} = \mu_{lk} + 2\delta_{lk},$$

то умову (2) можна записати у вигляді

$$L_{lk} \leq BV_{ijk} \leq H_{lk}. \quad (4)$$

При цьому множина точок, які задовольняють умові (4), утворюють паралелепіпед у просторі спектральних ознак. Якщо значення спектральної яскравості пікселя знаходиться в середині цього паралелепіпеда, то цей піксель буде віднесений до даного класу [11–12].

Метод паралелепіпедів може працювати на базі простого та дуже швидкого алгоритму. Але метод паралелепіпедів має певні недоліки. Перший недолік полягає у тому, що область розподілу значень спектральних ознак кожного із класів має чіткі границі [11–12]. Через це при класифікуванні на зображенні може залишитися досить велика кількість не-класифікованих пікселів, які не віднесені до жодного класу. Другим недоліком методу паралелепіпедів є те, що його не можна застосовувати при комбінуванні неповних, неточних та суперечливих даних, отриманих із різних спектральних каналів. Тому у цьому випадку слід використовувати правило комбінування Демпстера-Шейфера.

Правило комбінування Демпстера

У теорії Демпстера-Шейфера основним поняттям є поняття «маси». «Маса» («базова ймовірність») є узагальненням класичного поняття ймовірності. «Маса» дає можливість відокремити поняття відсутності довіри від недовіри.

Припустимо, A_0 – обмежена множина, а A_i ($i=1,2,\dots$) – її підмножини, тоді базова маса визначається таким чином:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0, \\ \sum_{A_i \subseteq A_0} m(A_i) = 1, \quad (i=0,1,2,\dots). \end{cases} \quad (5)$$

Якщо m_1 та m_2 – базові маси (базові ймовірності) певної гіпотези, отриманої з незалежних доведень, а A_{1i} та A_{2j} ($i, j=0,1,2,\dots$) – відповідні центральні елементи ($m(A_{1i}) > 0, m(A_{2j}) > 0$) [13–14]. Тоді правило комбінування Демпстера задає нову базову масу, яку можна обчислити таким чином:

$$m(A_k) = \frac{\sum_{A_{1i} \cap A_{2j} = A_k} m_1(A_{1i}) m_2(A_{2j})}{1 - C}, \quad (6)$$

де, згідно з [13–14], маємо таку формулу для коефіцієнта конфліктності:

$$C = \sum_{A_{1i} \cap A_{2j} = \emptyset} m_1(A_{1i}) m_2(A_{2j}). \quad (7)$$

При цьому коефіцієнт конфліктності C вказує, наскільки суперечливими між собою є джерела інформації [13–14]. C приймає значення в інтервалі $[0;1]$. Чим сильніші протиріччя між джерелами інформації, тим ближче до “1” стає значення коефіцієнта конфліктності C .

Для проведення процедури класифікування за наявності неповної та суперечливої інформації можна застосовувати правило комбінування Інагакі. Наведемо його основні положення.

Правило комбінування Інагакі

Правило комбінування Інагакі [15] для довільної непустиї підмножини $X = X_1 \cap X_2$ визначається таким чином:

$$m_k(X) = [1 + kq(\emptyset)] \cdot q(X), \quad X \neq \Omega, \emptyset, \quad (8)$$

де

$$q(X) = \sum_{\substack{X_1, X_2 \in 2^\Omega \\ X_1 \cap X_2 = X}} m_1(X_1)m_2(X_2); \quad (9)$$

$q(\emptyset)$ – базова маса ймовірності по всіх пустих перетинах фокальних елементів;
 k – параметр для нормалізації, який задовольняє такій умові:

$$0 \leq k \leq \frac{1}{1 - q(\emptyset) - q(\Omega)}. \quad (10)$$

За умови, якщо $X = \Omega$, тоді виконується

$$m_k(\Omega) = [1 + kq(\emptyset)]q(\Omega) + [1 + kq(\emptyset) - k]q(\emptyset), \quad (11)$$

де $q(\Omega)$ – функція базових мас імовірності по всіх непустих перетинах фокальних елементів.

При $k = \frac{1}{1 - q(\emptyset)}$ правило Інагакі буде співпадати із правилом комбінування

Демпстера.

Приклад

Припустимо, що ми маємо такі гіпотези.

Гіпотеза F означає, що ділянка належить до класу “Розливи нафти”.

Гіпотеза B означає, що ділянка належить до класу “Забудови та дороги”.

Гіпотеза G означає, що ділянка належить до класу “Неглибокі заболочені водойми”.

Припустимо, що маємо базові маси, надані на основі 2-х джерел свідчень:

$$m_1(\{F\}) = 0,2, \quad m_1(\{G\}) = 0,5, \quad m_1(\{F, B\}) = 0,3,$$

$$m_2(\{G\}) = 0,1, \quad m_2(\{F, B\}) = 0,6, \quad m_2(\{F, G\}) = 0,3.$$

У табл. 1 наведемо всі можливі перетини фокальних елементів.

Таблиця 1 – Дані, що отримані із двох спектральних каналів, та їх перетини

Базові маси m_1 та m_2	$m_1(\{F\})$	$m_1(\{G\})$	$m_1(\{F, B\})$
$m_2(\{G\})$ 0,1	\emptyset 0,02	$\{G\}$ 0,05	\emptyset 0,03
$m_2(\{F, B\})$ 0,6	$\{F\}$ 0,12	\emptyset 0,3	$\{F, B\}$ 0,18
$m_2(\{F, G\})$ 0,3	$\{F\}$ 0,06	$\{G\}$ 0,15	$\{F\}$ 0,09

Розрахуємо комбіновані значення базових імовірностей (базових мас) для перетинів фокальних елементів основи аналізу θ за правилом Інагакі при таких значеннях нормалізуючої константи k :

$$k: 0; 1; 1,5385; 2.$$

Комбінуємо базові маси:

$m(\{F\}) = 0,2 \cdot 0,6 + 0,2 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,3 = 0,27$ – базова маса того, що полігон належить класу “Розливи нафти”;

$m(\{G\}) = 0,5 \cdot 0,1 + 0,5 \cdot 0,3 = 0,2$ – базова маса того, що полігон належить класу “Неглибокі заболочені водойми”;

$m(\{F, B\}) = 0,3 \cdot 0,6 = 0,18$ – базова маса того, що полігон належить до класу “Розливи нафти” або до класу “Забудови та дороги”;

$m(\{\emptyset\}) = q(\{\emptyset\}) = 0,2 \cdot 0,1 + 0,5 \cdot 0,6 + 0,3 \cdot 0,1 = 0,35$ – сума базових мас для пустих перетинів фокальних елементів.

Далі застосовуємо правило Інагакі:

1) $k = 0$:

$$m^1(\{F\}) = [1 + 0 \cdot 0,35] \cdot 0,27 = 0,27,$$

$$m^1(\{G\}) = [1 + 0 \cdot 0,35] \cdot 0,2 = 0,2,$$

$$m^1(\{F, B\}) = [1 + 0 \cdot 0,35] \cdot 0,18 = 0,18.$$

2) $k = 1$:

$$m^2(\{F\}) = [1 + 1 \cdot 0,35] \cdot 0,27 = 0,3645,$$

$$m^2(\{G\}) = [1 + 1 \cdot 0,35] \cdot 0,2 = 0,27,$$

$$m^2(\{F, B\}) = [1 + 1 \cdot 0,35] \cdot 0,18 = 0,243.$$

Звідси маємо, що сума отриманих комбінованих мас буде $m^2(\{F\}) + m^2(\{G\}) + m^2(\{F, B\}) = 0,8775 < 1$, оскільки взяте значення нормалізуючої

константи $k = 1 < \frac{1}{1 - q(\emptyset)} = \frac{1}{1 - 0,35} = 1,5385$.

3) $k = \frac{1}{1 - q(\emptyset)} = \frac{1}{1 - 0,35} = 1,5385$:

$$m^3(\{F\}) = [1 + 1,5385 \cdot 0,35] \cdot 0,27 = 0,4154,$$

$$m^3(\{G\}) = [1 + 1,5385 \cdot 0,35] \cdot 0,2 = 0,3077,$$

$$m^3(\{F, B\}) = [1 + 1,5385 \cdot 0,35] \cdot 0,18 = 0,2769.$$

У даному випадку отримані результати співпадають із результатами комбінування за правилом Демпстера.

Тобто, якщо значення $k = \frac{1}{1 - q(\emptyset)}$ підставимо у формулу (8) для розрахунку комбінованих базових імовірностей за правилом Інагакі, то отримаємо формулу для знаходження комбінованих базових імовірностей за правилом Демпстера:

$$m_k(X) = [1 + kq(\emptyset)] \cdot q(X) = \left[1 + \frac{1}{1 - q(\emptyset)} \cdot q(\emptyset) \right] \cdot q(X) = \left[\frac{1 - q(\emptyset) + q(\emptyset)}{1 - q(\emptyset)} \right] \cdot q(X) = \\ = \left[\frac{1}{1 - q(\emptyset)} \right] \cdot q(X) = \left[\frac{1}{1 - C} \right] \cdot q(X), \quad X \neq \Omega, \emptyset.$$

У даному випадку формула для обчислення комбінованих імовірностей за правилом Інагакі співпадає з формулою для обчислення комбінованих імовірностей за правилом Демпстера.

4) $k = 2$:

$$m^4(\{F\}) = [1 + 2 \cdot 0,35] \cdot 0,27 = 0,459,$$

$$m^4(\{G\}) = [1 + 2 \cdot 0,35] \cdot 0,2 = 0,34,$$

$$m^4(\{F, B\}) = [1 + 2 \cdot 0,35] \cdot 0,18 = 0,306.$$

Отже, отримали, що сума комбінованих імовірностей буде $m^2(\{F\}) + m^2(\{G\}) + m^2(\{F, B\}) = 1,105 > 1$, оскільки взяті значення нормалізуючої константи $k = 2$ більше, ніж $k = \frac{1}{1 - q(\emptyset)} = \frac{1}{1 - 0,35} = 1,5385$.

5) Після проведення процедури класифікування одним із трьох наведених вище методів формуємо карту розливів нафти на ґрунті. При цьому карта нафтозабруднень створюється на основі аналізу змін спектральних характеристик площ нафтозабруднень із використанням двох чи більше знімків, отриманих за різні роки.

4. Висновки

На даний час вирішення багатьох задач ДЗЗ потребує вхідних даних, які отримуються з різних спектральних каналів. Тому розробка методів контрольованого класифікування, які ґрунтуються на об'єднанні даних, отриманих від різних джерел інформації, і надалі залишається однією, із найбільш актуальних задач.

Процедура класифікування є однією з основних процедур, яка застосовується для обробки знімків, що отримуються із використанням як супутників, так і безпілотних літальних апаратів (БПЛА). У статті було зазначено, що для проведення класифікування територій та складання карт місцевості застосовуються вегетаційні індекси, такі як нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI), зелений нормалізований диференційний вегетаційний індекс (GNDVI), вдосконалений вегетаційний індекс (EVI), вегетаційний індекс хлорофілу (CVI) та ін., у залежності від конкретної задачі.

У даній роботі було запропоновано використовувати нормалізований диференційний вегетаційний індекс як один із кроків для здійснення процедури класифікування місцевості та складання карти досліджуваної території. Зазначалося, що основною перевагою NDVI є нескладні та негроміздкі розрахунки й відсутність потреби у додаткових даних, крім даних ДЗЗ. У роботі було показано, як можна скомбінувати використання нормалізованого диференційного вегетаційного індексу з такими методами класифікування, а саме: методом паралелепіпедів, методом Демпстера-Шейфера та правилом Інагакі. Було показано, що індекс NDVI використовується для відбору класів об'єктів, які нам потрібні, і дає змогу відкидати ті класи, які не потрібні для розв'язання задачі. Дана процедура дає змогу відкидати зайві дані, що, у свою чергу, зменшує об'єм обчислень та підвищує точність класифікування. Також завдяки проведенню даної процедури зменшується кількість пікселів на знімку, які неправильно класифіковані. Після застосування індексу NDVI на наступ-

ному етапі було запропоновано застосовувати метод контрольованого класифікування, а саме метод паралелепіпедів. А за наявності неповної та суперечливої інформації було запропоновано використовувати метод Демпстера-Шейфера та правило Інагакі. Також у статті було наведено числовий приклад використання правила Інагакі та зазначено, що даний підхід може бути використаний для розв'язання задач екологічного моніторингу, класифікування лісів, сільськогосподарських земель, урбанізованих територій, вирішення природно-ресурсних задач [16–18].

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Chang C.I. *Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. 1164 p.
2. Crippen R.E. Calculating the Vegetation Index Faster. *Remote Sensing of Environment*. 1990. Vol. 34. P. 71–73.
3. Huete A.R., Chen J., Jiang Z., Li J., Yan G., Zhang X., Chen Yu. Localización Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote sensing of environment*. 2016. Vol. 101, N 3. P. 366–378.
4. Хамедов В.А., Копылов В.Н., Полищук Ю.М., Шимов С.В. Использование данных дистанционного зондирования в задачах лесной отрасли. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений*: сб. научн. ст. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. С. 380–387.
5. Brownlee K.A. *Statistical theory and methodology in science and engineering*. New York: John Wiley and Sons, 1965. P. 580–590.
6. Renyi A. *Probability theory*. Amsterdam: North-Holland Pub. Co, 1970. 670 p.
7. Альперт С.І. Удосконалений метод комбінування даних на основі теорії Демпстера-Шейфера за наявності суперечливих даних. *Математичні машини і системи*. 2018. № 2. С. 33–39.
8. Abidi M.A., Gonzalez R.C. *Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence*. New York: Academic, 1992. P. 562–569.
9. Congalton R.A. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 1991. N 37. P. 35–46.
10. Гарбук С., Гершензон В. *Космические системы дистанционного зондирования Земли*. М.: Изд-во А и Б, 1997. 296 с.
11. Gong P. Integrated Analysis of Spatial Data from Multiple Sources: Using Evidential Reasoning and Artificial Neural Network Techniques for Geological Mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1996. Vol. 62, N 5. P. 513–523.
12. Альперт С.І. Аналіз методів відбору найбільш інформативних спектральних каналів для вивчення об'єктів дистанційного зондування. *Математичні машини і системи*. 2014. № 2. С. 71–77.
13. Shafer G. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1976. P. 875–883.
14. Кузнецов А.В., Мясников В.В. Сравнение алгоритмов управляемой поэлементной классификации гиперспектральных изображений. *Компьютерная оптика*. 2014. Т. 38, № 3. С. 494–502.
15. Inagaki T. Interdependence between Safety-Control Policy and Multiple-Sensor Schemes Via Dempster-Shafer Theory. *IEEE Transactions on Reliability*. 1991. Vol. 40, N 2. P. 182–188.
16. Popov M., Alpert S., Podorvan V., Topolnytskyi M., Mieshkov S. Method of Hyperspectral Satellite Image Classification under Contaminated Training Samples Based on Dempster-Shafer's Paradigm. *Central European Researchers Journal*. 2015. Vol. 1, N 1. P. 86–97.
17. Альперт С.І. Порівняння нового удосконаленого підходу комбінування суперечливих даних із правилом Ягера. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2018. № 17. С. 14–17. URL: <http://www.ujrs.org.ua/ujrs>.
18. Лурье И.К., Косиков А.Г. *Теория и практика цифровой обработки изображений*. М.: Научный мир, 2003. 356 с.

Стаття надійшла до редакції 05.01.2022