

М. О. Попов, С. А. Станкевич, М. В. Топольницький,  
О. В. Седлєрова

## Підхід до інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних на основі теорії свідчень Демпстера–Шейфера

(Представлено академіком НАН України В. І. Ляльком)

*Запропоновано і обґрунтовано новий підхід до інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних на основі математичної теорії свідчень Демпстера–Шейфера, який дозволяє інтегрувати зазначені дані, будувати карти просторового розподілу функції довіри схожості з позитивними структурами (встановленими покладами вуглеводнів), що є інформаційним забезпеченням підтримки прийняття рішень про нафтогазоперспективність. Наведено приклади його реалізації на ділянках прикерченського шельфу Чорного моря та акваторії Азовського моря. Даний підхід дає змогу кількісно оцінити ступінь їх перспективності, конкретизувати задачі для подальших геологорозвідувальних робіт.*

Глобальні трансформаційні процеси привели до того, що сучасне суспільство є інформаційним, а не постіндустріальним. Це зумовлено, в першу чергу, потужними циркулюючими інформаційними потоками і зростаючим об'ємом даних (який можна використовувати для вирішення важливих питань в багатьох сферах життєдіяльності людства) та стосується й прикладних геолого-геофізичних задач (наприклад, пошуку вуглеводнів).

Дані для інтегрування надходять з різних інформаційних джерел (наприклад, дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), геолого-геофізичні дані, карти рельєфу місцевості тощо) та можуть мати різні форми представлення (параметричну, просторову тощо), і їх інтеграція є достатньо складною логіко-обчислювальною процедурою, обґрунтування якої та оцінка ефективності потребують відповідного науково-методичного апарату [1, 2].

Методи інтеграції, в основі яких лежить теоретико-імовірнісний підхід, розглянуто в наукових публікаціях [3, 4]. Ці методи просто та зручно застосовувати, тому що програмне забезпечення передбачає багато способів їх реалізації. Однак на основі ймовірно-статистичних методів інтеграції можна отримати сталі і достовірні результати лише за умови наявності досить великих вибірок відповідних даних щодо досліджуваного об'єкта або явища, що далеко не завжди може бути забезпечено на практиці. Ще одним недоліком цих методів є неспроможність опрацьовувати суперечливі дані та дані, відносно яких немає інформації (випадок необізнаності про об'єкт або явище дослідження). Наведені факти, а також аналіз природи даних ДЗЗ та геолого-геофізичних показують, що не завжди можна спиратися тільки на такі методи під час їх опрацювання.

Тому все частіше при комплексуванні гетерогенних даних використовують методи теорії свідчень Демпстера–Шейфера [5], які дозволяють ефективно обробляти неповні знання, забезпечувати спільний аналіз і злиття даних (зокрема, отриманими багатоспектральними/гіперспектральними супутниковими сенсорами [6]) та формувати підсумкові оцінки можливості тієї або іншої гіпотези відносно реального об'єкта або явища.

Суть математичної теорії свідчень Демпстера–Шейфера зводиться до подібності з теорією ймовірностей, де кожній гіпотезі може бути присвоєно свою відповідну ймовірність, кожному елементу множини  $\theta$ , що є основою аналізу з кардинальним числом  $2^N$ , присвоюється відповідна функція маси ( $m$ ), область значень якої лежить в інтервалі від 0 до 1. При відображенні  $m: 2^N \rightarrow [0, 1]$  враховуються такі правила: функція маси пустої множини дорівнює нулю:  $m(\emptyset) = 0$ ; сума мас для кожної підмножини  $A \subseteq \Theta$  дорівнює одиниці:  $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$ . На змістовному рівні  $m$  можна розглядати як міру довіри до зв'язаної з нею гіпотези, тому  $m(A)$  називають також базовою масою довіри гіпотези  $A$ , а будь-яку гіпотезу  $A$ , для якої  $m(A) > 0$  — фокальним елементом. Використовуючи поняття базової маси довіри, в теорії свідчень вводяться поняття довіри (*Belief*) і правдоподібності (*Plausibility*), які для будь-якої складної гіпотези  $X \subseteq \Theta$  обчислюються відповідно за виразами:

$$\text{Bel}(X) = \sum_{A_i | A_i \subseteq X} m(A_i); \quad \text{Pls}(X) = \sum_{A_i | A_i \cap X \neq \emptyset} m(A_i). \quad (1)$$

Функція довіри  $\text{Bel}(X)$  визначає сумарний рівень впевненості, що віддається гіпотезі  $X \subseteq \Theta$ , функція правдоподібності  $\text{Pls}(X)$  — рівень розширення, до якого гіпотеза  $X$  ще може вважатися правдоподібною. Для будь-якої гіпотези  $X$  завжди має місце  $\text{Bel}(X) \leq \text{Pls}(X)$ . Значення  $\text{Bel}(X)$  і  $\text{Pls}(X)$  визначають нижню і верхню границі інтервалу, в якому лежить точна оцінка достовірності гіпотези  $X$ . Цей інтервал  $[\text{Bel}(X), \text{Pls}(X)]$  іменується “інтервалом довіри” для даної гіпотези, а його ширина визначає похибку оцінки.

Як було вказано вище, однією з важливих властивостей теорії свідчень є наявність простої процедури для об'єднання інформації від різних джерел. Таке об'єднання здійснюється за допомогою комбінаційного правила Демпстера [5]:

$$m_D(X) = \frac{1}{1 - K} \sum_{\substack{B_1 \cap \dots \cap B_R = X \\ \forall (X \neq \emptyset) \in 2^N}} \prod_{1 \leq p \leq P} m_p(B_p), \quad (2)$$

де  $K$  — коефіцієнт конфліктності:

$$K = \sum_{\substack{B_1 \cap \dots \cap B_R = \emptyset \\ \forall (X \neq \emptyset) \in 2^N}} \prod_{1 \leq p \leq P} m_p(B_p). \quad (3)$$

Область можливих значень коефіцієнта  $K$  лежить в інтервалі  $[0, 1]$ , при цьому нульове значення  $K$  вказує на відсутність конфлікту в гіпотезах (свідченнях) різних джерел, а чим більше джерела суперечать одне одному, тим ближче до одиниці наближається величина  $K$ .

З огляду на це, алгоритмічна процедура підходу до інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних на основі теорії свідчень Демпстера–Шейфера може бути представлена структурно-логічною схемою (рис. 1), що включає три етапи:

**I — початковий:** окремо проводиться попереднє оброблення вхідних даних. Для даних ДЗЗ здійснюють (при необхідності) геометричне, радіометричне, атмосферне коригування, геореференціювання, регуляризацію та формування похідних дешифрувальних ознак.

Для геолого-геофізичних даних здійснюють (при необхідності) геореференціювання, інтерполяцію, регуляризацію та конвертування до растру. Крім того, проводиться побудова гіперкуба відповідних даних.

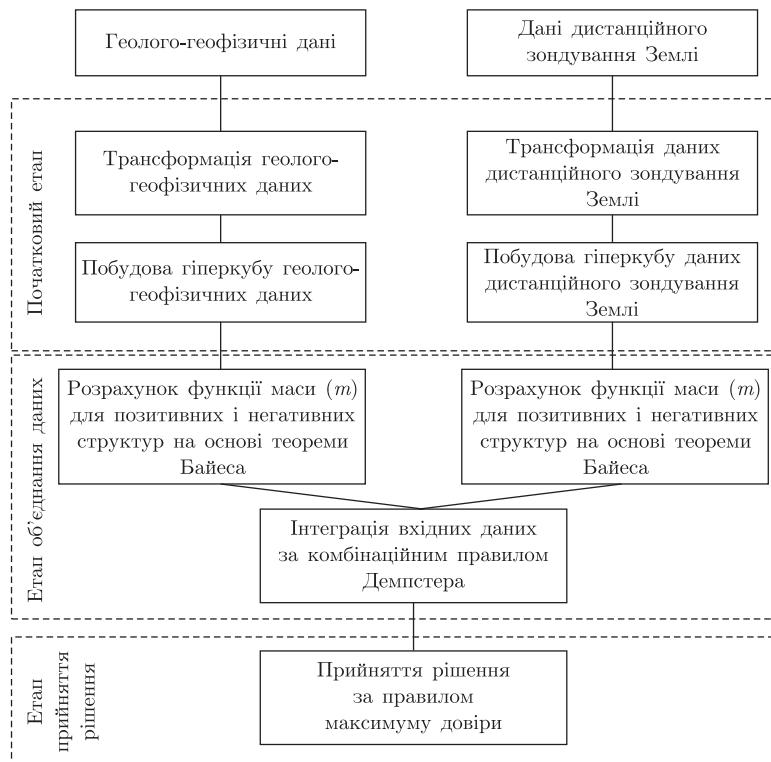


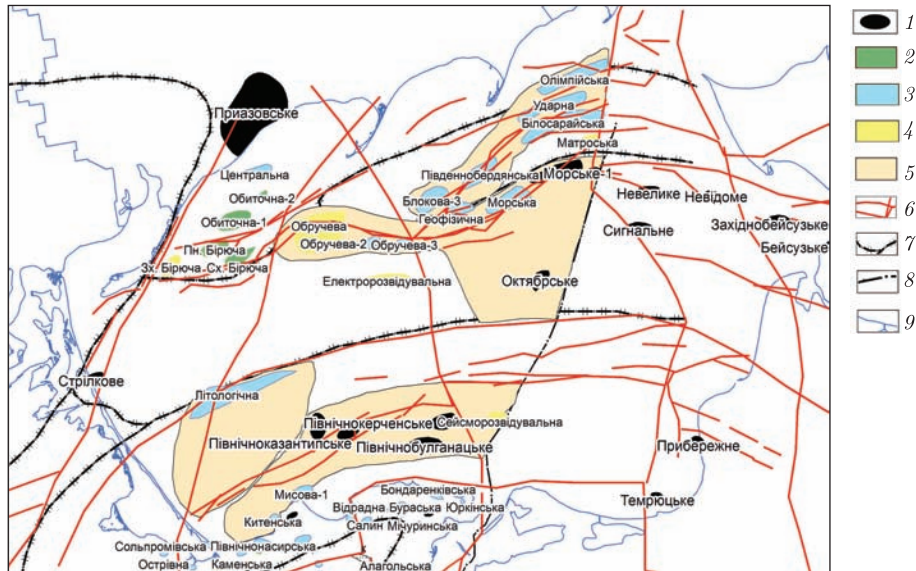
Рис. 1. Структурно-логічна схема підходу

**II** — *об'єднання даних*: визначається величина функції маси позитивних і негативних структур для вхідних даних на основі байєсовської класифікації та об'єднуються дані за комбінаційним правилом Демпстера. Під час проведення байєсовської класифікації величину апріорної імовірності визначених класів можна обирати довільно та з урахуванням попередніх досліджень у вигляді зображень для кожного класу або її числового значення.

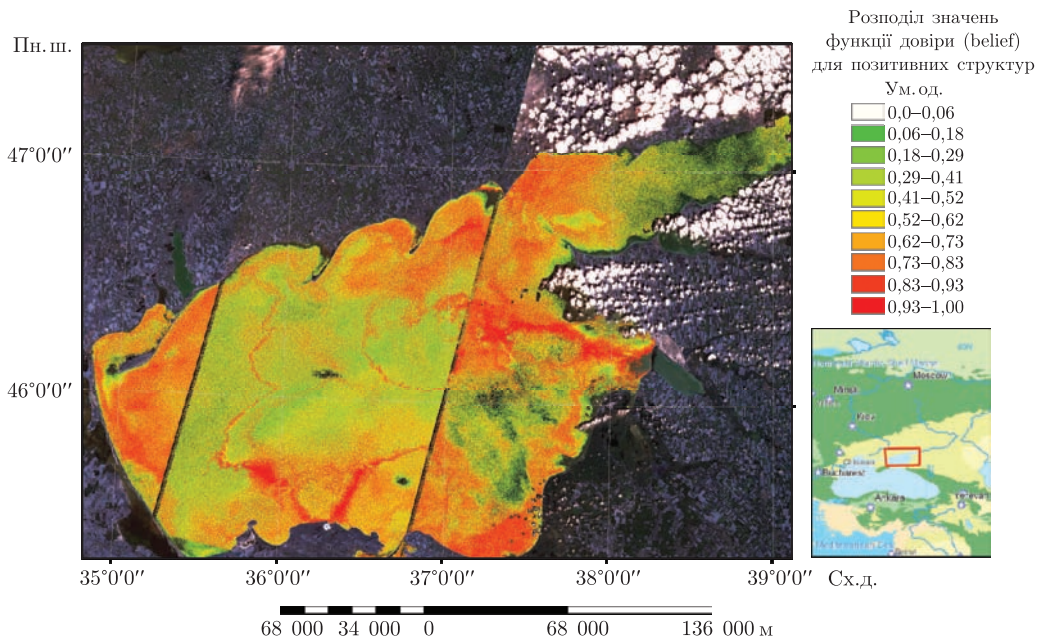
**III** — *прийняття рішення*: для позитивних структур, перспективних на наявність покладів вуглеводнів, рішення приймається на основі критерію максимуму довіри.

Запропонований підхід до інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних на основі теорії свідчень Демпстера–Шейфера був успішно застосований у ряді практичних задач, зокрема, для визначення нафтогазоперспективних ділянок Азовського моря та прикерженського шельфу Чорного моря. Раніше на цих акваторіях з використанням комплексної методики були виділені нафтогазоперспективні ділянки [7], які потребували підтвердження іншими методами (рис. 2, а і 3, а).

Для створення інтегральної просторової геологічної моделі за основу було взято: карту залишкового гравітаційного поля, карту аномалій магнітного поля, структурні карти підшви платформного чохла та основних нафтогазоносних комплексів у відкладах осадочного чохла і дані батиметрії. Для аналізу геоіндикаційних ознак глибинних геологічних структур використовувались космічні знімки Landsat-7/ETM+ (просторова розрізненість 30 м; 7 спектральних каналів), а також дані про рельєф, водне середовище та поверхню води, що отримані наземними та супутниковими вимірюваннями. Як еталонні враховували просторові умови, що властиві родовищам вуглеводнів.



а

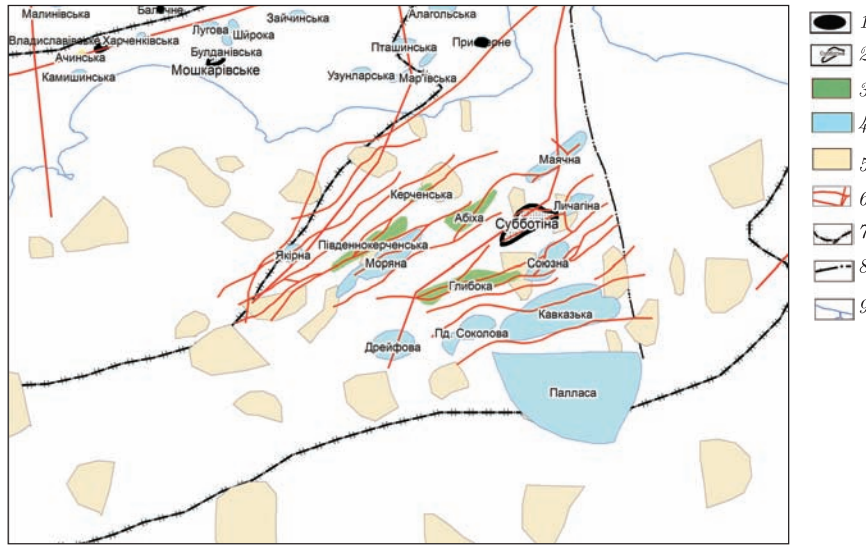


б

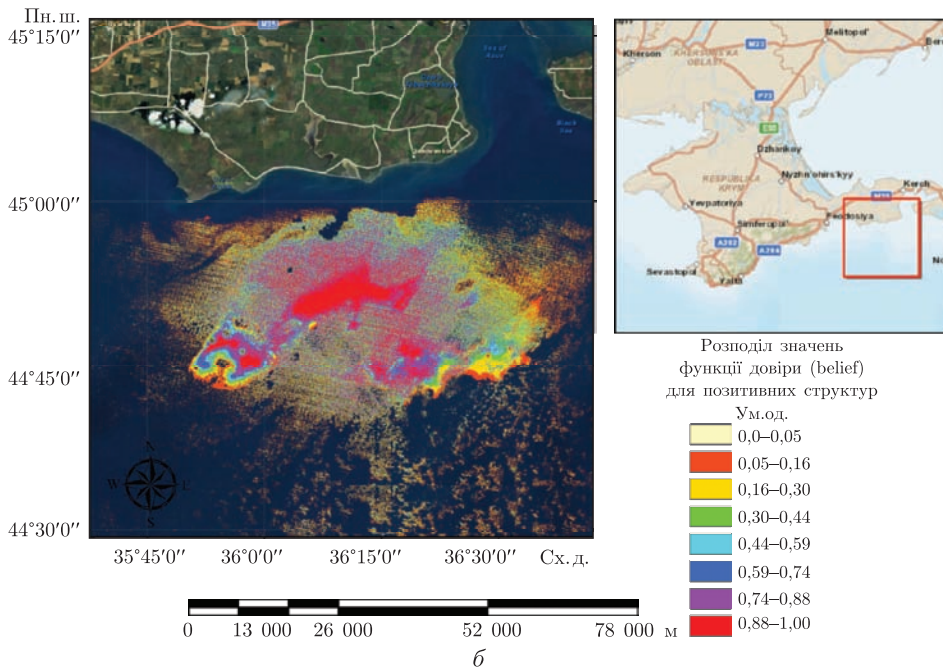
Рис. 2. Азовське море.

а: Карта родовищ та нафтогазоперспективних структур з нафтогазоперспективними ділянками, виявлені за комплексною методикою: 1 — газові та нафтогазові родовища; 2 — структури, що підготовлені до буріння; 3 — структури, що виявлені геофізичними методами; 4 — структури, що перебувають у бурінні; 5 — нафтогазоперспективні ділянки, визначені за комплексною методикою (О. В. Седлєрова, 2010 р.); 6 — глибинні розломи, згідно з геофізичними даними; 7 — границі тектонічних елементів; 8 — міждержавна економічна границя; 9 — берегова лінія.

б: Розподіли функції довіри схожості з позитивними структурами для акваторії Азовського моря на основі математичної теорії свідчень Демпстера–Шейфера



a



b

Рис. 3. Прикерченський шельф Чорного моря.

a: Карта родовищ та нафтогазоперспективних структур з нафтогазоперспективними ділянками, виявленими за комплексною методикою: 1 – газові та нафтогазові родовища суходолу; 2 – нафтогазове родовище Субботіна; 3 – структури, що підготовлені до буріння; 4 – структури, що виявлені геофізичними методами; 5 – нафтогазоперспективні ділянки, що визначені за комплексною методикою (О. В. Седлєрова, 2011 р.); 6 – глибинні розломи, згідно з геофізичними даними; 7 – границі тектонічних елементів; 8 – міждержавна економічна границя; 9 – берегова лінія.

b: Розподіли функції довіри схожості з позитивними структурами прикерченського шельфу Чорного моря на основі математичної теорії свідчень Демпстера–Шейфера

На рис. 2, б і 3, б відповідними кольорами зображено просторовий розподіл функції довіри подібності з позитивними структурами, які відповідають встановленим покладам вуглеводнів. Отримана карта розподілу значень статистичної подібності для позитивних структур показує зональний характер просторового розподілу нафтогазоносних і нафтогазоперспективних об'єктів, чітке розмежування ділянок з меншою і більшою перспективністю.

Подальша геологічна інтерпретація отриманих результатів підтверджує, що ділянки, за своїми характеристиками, подібні до еталонних позитивних прикладів, приурочені до транс-регіональних і регіональних зон розломів та ділянок їх перетину, а також тісно пов'язані з блоками підвищеної тектонічної активності.

Таким чином, даний підхід дає змогу уточнити місцезоналення зон нафтогазоперспективності, кількісно оцінити ступінь їх перспективності, конкретизувати задачі для подальших геологорозвідувальних робіт.

З урахуванням викладеного вище запропоновано й обгрунтовано новий підхід до інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних на основі теорії свідчень Демпстера–Шейфера, який дозволяє інтегрувати зазначені дані, будувати карти просторового розподілу функції довіри схожості з позитивними структурами (встановлені поклади вуглеводнів), що є підставою для прийняття інформаційних рішень відповідними фахівцями та спеціалістами.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на удосконалення та верифікацію запропонованого підходу інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних з метою підвищення точності визначення функції довіри при використанні даних різної фізичної природи.

1. Попов М. А., Станкевич С. А., Марков С. Ю. и др. Принципы геоинформационного обеспечения задач дистанционного поиска полезных ископаемых // Уч. зап. Таврич. нац. ун-та им. В. И. Вернадского. – 2012. – 25(64), № 1. – С. 177–190.
2. Leckie D. G. Synergism of synthetic aperture radar and visible/infrared data for forest type discrimination // Photogram. Eng. & Remote Sensing. – 1990. – 56. – P. 1237–1246.
3. Subhash C., Kok D. Bayesian and Dempster–Shafer fusion // Sadhana. – 2004. – 29, part 2. – P. 145–176.
4. Stathaki T. Image fusion: Algorithms and applications. – London: Acad. Press, 2008. – 500 p.
5. Shafer G. A mathematical theory of evidence. – Princeton: Princeton Univ. Press, 1976. – 297 p.
6. Popov M. A., Topolnitskiy M. V. Dempster–Shafer evidence theory-based approach to object classification on multispectral images // Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Digital Technol. (DT'2014), Žilina, Slovakia, 9–11 July 2014. – Žilina: IEEE, 2014. – P. 296–300.
7. Гожик П. Ф., Чебаненко І. І., Клочко В. П. та ін. Нафтогазоперспективні об'єкти України. Теоретичне і практичне обгрунтування пошуків нафти і газу в акваторіях України. – Київ: ЕКМО, 2010. – 200 с.

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень  
Землі Інституту геологічних наук  
НАН України”, Київ

Надійшло до редакції 14.11.2014

**М. А. Попов, С. А. Станкевич, М. В. Топольницький, О. В. Седлерова**

### **Подход к интеграции дистанционных и геолого-геофизических данных на основе теории свидетельств Демпстера–Шейфера**

*Предложен и обоснован новый подход к интеграции дистанционных и геолого-геофизических данных на основе математической теории свидетельств Демпстера–Шейфера, который позволяет интегрировать указанные данные, строить карты пространственного распре-*



ления функции доверия сходства с положительными структурами (установленными залежами углеводородов), являющийся информационным обеспечением поддержки принятия решений о нефтегазоперспективности. Приведены примеры его реализации на участках прикерченского шельфа Черного моря и акватории Азовского моря. Данный подход позволяет количественно оценить степень их перспективности, конкретизировать задачи для дальнейших геологоразведочных работ.

**M. A. Popov, S. A. Stankevich, M. V. Topolnitsky, O. V. Sedlerova**

### **An approach to integrating the remotely sensed, geological, and geophysical data using the Dempster–Shafer mathematical theory**

*A new approach to the integration of remote and geological and geophysical data is proposed and substantiated on the basis the Dempster–Shafer mathematical theory of evidence, which allows one to integrate these data and to build maps of the spatial distribution function of similarity trust with positive structures (established deposits of hydrocarbons). This is the basis for the informational support of a decision-making on the perspective to find oil-gas deposits. The examples of its implementation on areas the Prykerchensky shelf of the Black Sea and in the Azov Sea are given. This approach allows one to quantitatively evaluate the degree of their perspectives and to pose specific problems for further exploration works.*