

УДК 553.98:(004.67+004.93'12)

С.А. СТАНКЕВИЧ, О.В. ТИТАРЕНКО, С.И. ГОЛУБОВ  
Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ НЕФТЕГАЗОПЕРСПЕКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ

Основной целью исследований является повышение точности и надежности прогноза нефтегазоперспективных зон и нефтегазоносных объектов. Космогеологические исследования проводятся с целью оперативной оценки нефтегазоносности поисковых площадей на этапе, предшествующем их вводу в разведочное бурение. Современные технологии применения материалов дистанционно зондирования Земли в геолого-поисковых исследованиях основываются на интеграции с другими геопространственными данными – картографическими, геологическими, геофизическими, геохимическими и другими. Это позволяет устранить субъективизм, имеющий место при визуальной интерпретации спутниковых изображений. Интегрирование дистанционных и геолого-геофизических пространственных данных даёт возможность автоматизировать процесс оценки исследуемой площади и установить её сходство с эталонными участками (месторождениями). Классификация гиперкуба дистанционных и геолого-геофизических данных позволяет определить степень сходства исследуемых участков с эталонами и проранжировать их по перспективности. Предлагается модель интеграции дистанционных и геолого-геофизических данных на основе байесовского вероятностного вывода. При картировании нефтегазоперспективных участков оцениваются априорные и условные вероятности принадлежности растровых элементов гиперкуба данных позитивному или негативному эталону с последующим вычислением апостериорной вероятности принадлежности каждого элемента положительному эталону. Описанная модель апробирована на примере Хухринского нефтегазоконденсатного месторождения, расположенного в Ахтырском районе Сумской области Украины. Месторождение характеризуется сложным геологическим строением и для его изучения включены все имеющиеся в наличии гетерогенные геопространственные данные. В результате выполненной интеграции дистанционных и геолого-геофизических данных получено пространственное распределение апостериорной вероятности, которую можно трактовать как комплексную оценку нефтегазоперспективности исследуемой площади. Результаты апробации хорошо согласуются с предшествующими геологическими прогнозами.

Ключевые слова: нефтегазоперспективность, интеграция геопространственных данных, байесовский вероятностный вывод, Хухринское нефтегазоконденсатное месторождение

С.А. СТАНКЕВИЧ, О.В. ТИТАРЕНКО, С.І ГОЛУБОВ.  
Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНТЕГРАЦІЇ ГЕТЕРОГЕННИХ ДАНИХ ПРИ ОЦІНЮВАННІ НАФТОГАЗОПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕРИТОРІЙ

Основною метою досліджень є підвищення точності і надійності прогнозу нафтогазоперспективних зон і нафтогазоносних об'єктів. Космогеологічні дослідження проводяться для оперативної оцінки нафтогазоносності пошукових площ на етапі, що передує їх введення в розвідувальне буріння. Сучасні технології застосування матеріалів дистанційного зондування Землі в геолого-пошукових дослідженнях ґрунтуються на інтеграції з іншими геопросторовими даними - картографічними, геологічними, геофізичними, геохімічними та іншими. Це дозволяє усунути суб'єктивізм, що має місце при візуальній інтерпретації супутникових зображень. Інтегрування дистанційних та геолого-геофізичних просторових даних дає можливість автоматизувати процес оцінки досліджуваної площі і встановити її схожість з еталонними ділянками (родовищами). Класифікація гіперкуба дистанційних та геолого-геофізичних даних дозволяє визначити ступінь подібності досліджуваних ділянок з еталонами і проранжувати їх за перспективністю. Пропонується модель інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних на основі байєсівського імовірнісного виведення. При картуванні нафтогазоперспективних ділянок оцінюються априорні і умовні ймовірності приналежності растрових елементів гіперкуба даних позитивному або негативному еталону з подальшим обчисленням апостеріорної ймовірності приналежності кожного елемента позитивному еталону. Запропонована модель апробована на прикладі Хухрінського нафтогазоконденсатного родовища, розташованого в Охтирському районі Сумської області України. Родовище

характеризується складною геологічною будовою і для його вивчення використовувалися всі наявні гетерогенні геопросторові дані. В результаті виконаної інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних отримано просторовий розподіл апостеріорної ймовірності, яку можна трактувати як комплексну оцінку нафтогазоперспективності площі, що досліджувалася. Результати апробації добре узгоджуються з попередніми геологічними прогнозами.

*Ключові слова:* нафтогазоперспективність, інтеграція геопросторових даних, байєсівське ймовірнісне виведення, Хухрінське нафтогазоконденсатне родовище

S. STANKEVICH, O. TITARENKO, S. GOLUBOV  
Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, NAS of Ukraine

## **MATHEMATICAL MODEL FOR HETEROGENEOUS DATA INTEGRATION IN THE OIL AND GAS PROSPECTS ESTIMATING**

*The main purpose of the research is to improve the accuracy and reliability of forecasting oil and gas promising zones and oil and gas objects. Cosmogeological studies are carried out to quickly assess the oil and gas content of prospecting areas at the stage preceding their introduction into exploratory drilling. Modern technologies for the use of Earth remote sensing materials in geological prospecting studies are based on integration with other geospatial data - cartographic, geological, geophysical, geochemical and others. This eliminates the subjectivity associated with the visual interpretation of satellite images. The integration of remote sensing and geological-geophysical spatial data makes it possible to automate the process of assessing the area under study and to establish its similarity with the reference areas (fields). The classification of the hypercube of remote data and geological and geophysical data allows you to determine the degree of similarity of the studied areas with the standards and rank them according to their prospects. A model for the integration of remote sensing and geological-geophysical data based on Bayesian probabilistic inference is proposed. When mapping oil and gas promising areas, the a priori and conditional probabilities of belonging of the raster elements of the data hypercube to a positive or negative standard are estimated, followed by the calculation of the posterior probability that each element belongs to a positive standard. The described model has been tested on the example of the Khukhrinsky oil and gas condensate field located in the Akhtyrsky district of the Sumy region of Ukraine. The deposit is characterized by a complex geological structure and all available heterogeneous geospatial data are included for its study. As a result of the performed integration of remote sensing and geological and geophysical data, a spatial distribution of the posterior probability was obtained, which can be interpreted as a comprehensive assessment of the oil and gas potential at the investigated area. The testing results correlate well with the previous geological forecasts.*

*Key words:* oil and gas prospects, integration of geospatial data, Bayesian probabilistic inference, Khukhrinskoye oil and gas condensate field

### **Постановка проблемы**

Прогнозирование и разведка месторождений нефти и газа является сложной и плохо формализуемой научно-практической задачей. Ее эффективное решение предполагает обработку и учёт всех имеющихся данных при помощи методов геопространственного анализа на основе соответствующих геоинформационных технологий.

Проведение прямых исследований при поиске нефти и газа (бурение, сейсморазведка) требует огромных затрат. Поэтому использование современных дистанционных технологий поиска, оценки и картирования месторождений углеводородов позволят снизить себестоимость геологоразведки и сократить сроки разработки этих полезных ископаемых.

Основной целью исследований в данном направлении является повышение точности и надежности прогноза нефтегазоперспективных зон и нефтегазоносных объектов. Дистанционные геологические исследования проводятся с целью оперативной оценки нефтегазоносности поисковых площадей на этапе, предшествующем их вводу в разведочное бурение. На данный момент существуют значительные объёмы разной необходимой геопространственной информации: данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); геологические, геофизические данные

и т. п., которые позволяют в короткие сроки и с наименьшими финансовыми затратами реализовать такие исследования. Однако большие объёмы гетерогенных данных из разных информационных источников, с одной стороны, дополняют друг друга, а, с другой, требуют наличия адаптированного и гибкого научно-методического аппарата их интеграции, совместной обработки и анализа.

### Анализ публикаций

Вопросу интеграции гетерогенных геопространственных данных посвящены работы ряда авторов. Простейшим подходом к интеграции и совместной обработке данных от разных информационных источников является суммирование данных одинаковой физической природы [1]. В других случаях построение эффективной модели для слияния данных является сложной задачей. Методы интеграции, в основе которых лежат различные статистические и онтологические модели, рассмотрены в работах [2-4]. Эти методы достаточно эффективны, они реализованы в существующем программном обеспечении.

Современные технологии применения материалов ДЗЗ в геолого-поисковых исследованиях основываются на интеграции с другими геопространственными данными – картографическими, геологическими, геофизическими, геохимическими и многими другими [5, 6]. Это позволяет устранить субъективизм, имеющий место при визуальной интерпретации спутниковых изображений. Интегрирование дистанционных и геолого-геофизических геопространственных данных даёт возможность автоматизировать процесс оценки исследуемой площади и установить её сходство с эталонными участками (месторождениями) [7]. Для этого все имеющиеся геопространственные данные приводятся к единой сетке, регуляризуются и накладываются в виде отдельных слоёв гиперкуба данных [8]. Классификация гиперкуба дистанционных и геолого-геофизических данных позволяет определить степень сходства исследуемых участков с эталонами месторождений и проранжировать их по перспективности. Для классификации могут применяться классические статистические методы [9], в том числе непараметрические [10], детерминистские эвристические методы [11], методы на основе теории свидетельств [12], нечёткая логика [13], продукционные экспертные системы [14], искусственные нейронные сети [15] и др. При корректном анализе имеющихся данных ожидаются сходные результаты, получаемые различными методами [16]. В нашем исследовании для анализа гиперкуба геолого-геофизических и дистанционных данных использовалась классическая Байесовская вероятностная модель классификации регуляризованных многомерных выборок [17].

### Изложение основного материала исследования

**Метод.** Суть байесовского вероятностного вывода при картировании нефтегазоперспективных участков состоит в оценивании априорных и условных вероятностей принадлежности растровых элементов гиперкуба данных позитивному или негативному эталону с последующим вычислением апостериорной вероятности принадлежности каждого элемента положительному эталону. Полученная таким способом карта будет геопространственной проекцией имеющегося гиперкуба дистанционных и геолого-геофизических данных в пространстве нефтегазоперспективности.

Апостериорная вероятность позитивного эталона  $P^+(x)$  для текущего элемента  $x \in X$  гиперкуба данных  $X$  оценивается по формуле Байеса:

$$P^+(x) = \frac{P^+ \cdot P(x|X^+)}{P^+ \cdot P(x|X^+) + P^- \cdot P(x|X^-)}, \quad (1)$$

где  $P^+$ ,  $P^-$  – априорные вероятности положительного и отрицательного эталонов,  $P(x|x^+)$ ,  $P(x|x^-)$  – условные вероятности принадлежности элемента  $x$  положительному  $X^+$  и отрицательному  $X^-$  эталонам гиперкуба данных [18].

Для оценивания условных вероятностей  $P(x|x^+)$  и  $P(x|x^-)$  при нефтегазопроисследовательских исследованиях с привлечением дистанционных и геолого-геофизических данных может быть использована информационная дивергенция  $D(x|y)$  нормализованных векторов значений гиперкуба [19]:

$$D(x|y) = \int_{u \in U} f[x(u)] \cdot \log_2 \frac{f[x(u)]}{f[y(u)]} du, \quad (2)$$

где  $f$  – плотность вероятности распределения вектора значений в элементе гиперкуба,  $U$  – область возможных значений.

Плотности распределений векторов значений как отдельных элементов гиперкуба  $f(x)$ , так и позитивных  $f(X^+)$  и негативных  $f(X^-)$  эталонов могут быть оценены по соответствующим гистограммам гиперкуба данных [20]. Информационная дивергенция (2) однозначно связана с соответствующей условной вероятностью [21]:

$$P(x|x^+) \cong 1 - 2^{-n^+ \cdot D(x|x^+)}, \quad (3)$$

где  $n^+$  – мощность статистической выборки соответствующего эталона.

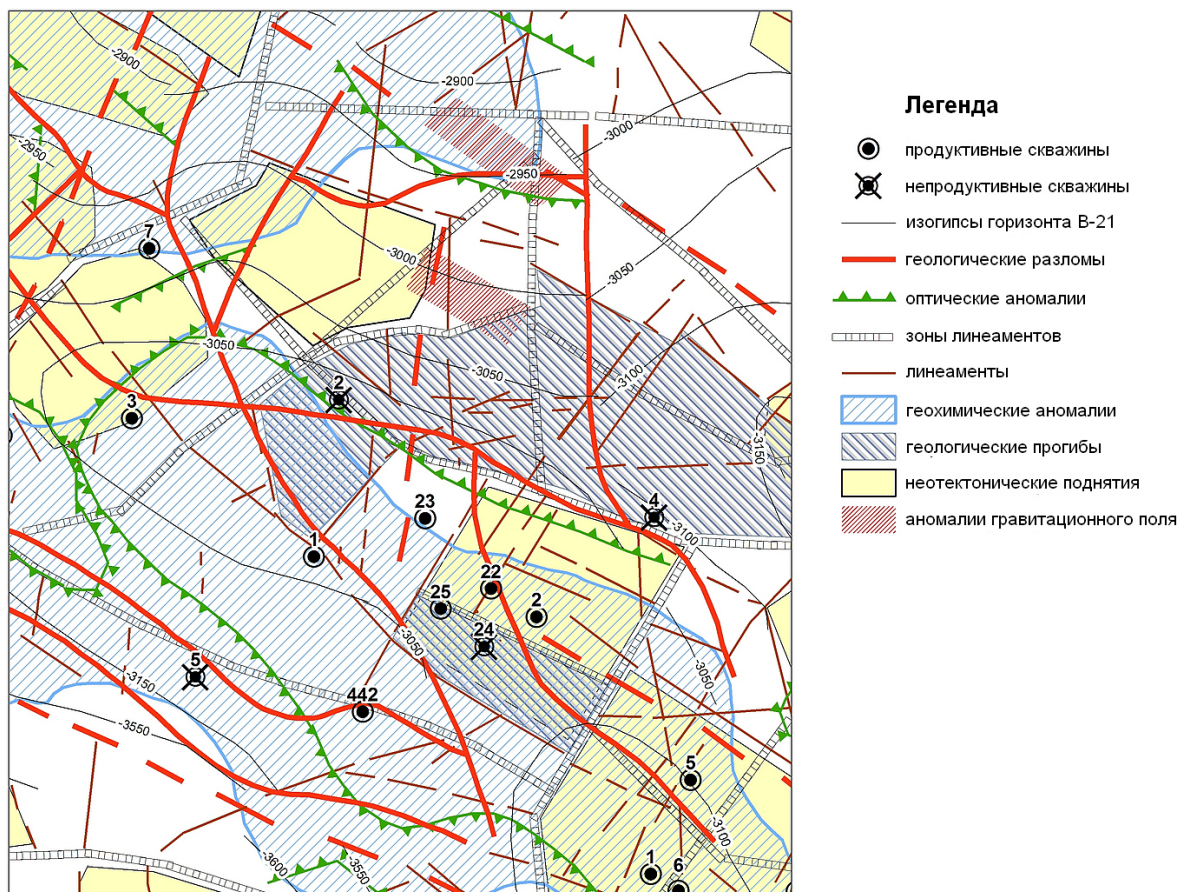
Картирование апостериорной вероятности (3) позитивного эталона по гиперкубу, собственно, и реализует интеграцию дистанционных и геолого-геофизических данных при оценивании нефтегазоперспективности территорий.

**Данные.** Аprobация предложенной модели интеграции дистанционных и геолого-геофизических данных на основе Байесовского вероятностного вывода проводилась на территории Хухринского нефтегазоконденсатного месторождения, расположенного в Ахтырском районе Сумской области Украины. Месторождение характеризуется сложным геологическим строением. В него входят толщи осадочных пород палеозойского, мезозойского и кайнозойского возрастов, которые залегают на кристаллических породах докембрийского фундамента. Внутри осадочного чехла имеются многочисленные стратиграфические несогласования.

В тектоническом отношении юго-западная часть месторождения расположена в пределах северной прибортовой зоны Днепровского грабена, а северо-восточная часть – в пределах северного борта Днепровско-Донецкой впадины. Они разделены зоной краевого нарушения. Рельеф фундамента северного борта и северной прибортовой зоны существенно отличаются [22, 23]. В зоне доказана продуктивность мезозойских и девонских нефтегазоносных комплексов. Залежи – слоистые, тектонически и литологически экранированные. Они образуют многослойные месторождения с разной комбинацией газо- и -нефтеносных горизонтов с глубинами залегания свыше 5000 м [24].

В интегральную геологическую модель Хухринского месторождения были включены имеющиеся гетерогенные геопространственные данные (рис.1): расположение буровых скважин (как продуктивных, так и непродуктивных); карта разломов, краевых и региональных нарушений; линеаменты и зоны линеаментов; карты

плотности линеаментов в разных направлениях; карта остаточного гравитационного поля; контур месторождения по данным сейсмографии; тепловые аномалии на территории месторождения; неотектонические (опущенные и поднятые) блоки; геохимические аномалии; оптические аномалии; маршруты наземного спектрометрирования почв и растительности; изогипсы структурного горизонта В<sub>21</sub>; карты осадочных толщ; цифровые данные рельефа; поверхности вертикального и горизонтального расчленения рельефа.

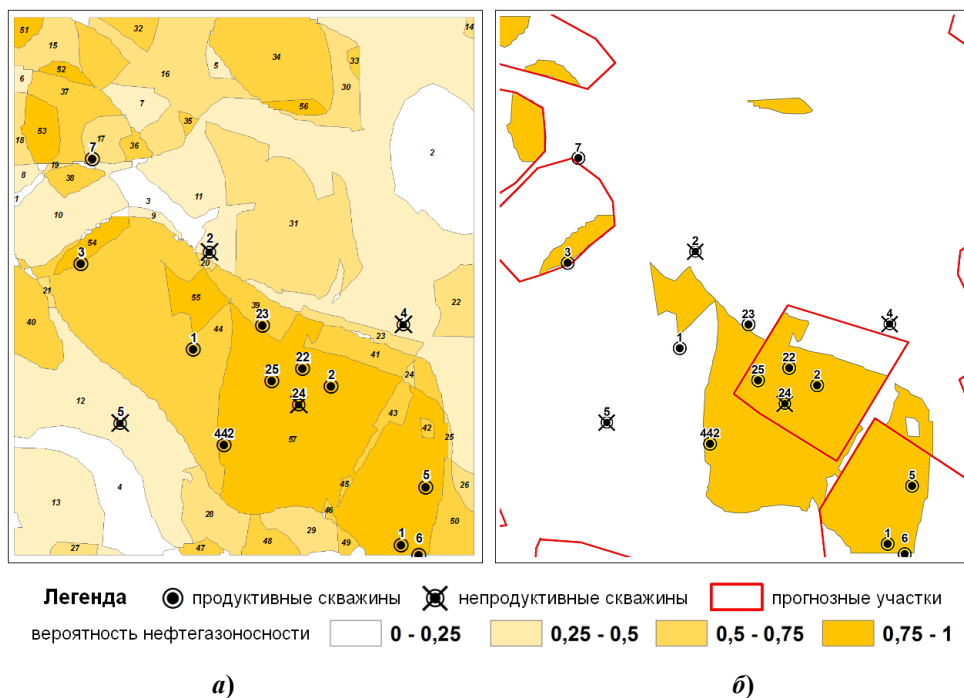


**Рис. 1. База геопространственных данных на территорию Хухринского нефтегазоконденсатного месторождения**

Все используемые геопространственные данные были геореференцированы, растеризованы, регуляризованы и приведены к пространственному разрешению 30 м для дальнейшего включения в гиперкуб.

**Результат.** В результате выполненной интеграции дистанционных и геолого-геофизических данных получено пространственное распределение апостериорной вероятности (рис. 2а), которую можно трактовать как комплексную оценку нефтегазоперспективности исследуемой площади.

В северной зоне Хухринского месторождения выделены несколько средних и мелких структур (участки 51, 52, 53, 56) с высокой вероятностью нефтегазоносности. Кроме того, можно рекомендовать участки 32, 33, 34, 35, 36 для дальнейших детальных геологоразведочных работ. Полученный результат хорошо коррелирует с имеющимся геологическими прогнозами и данными структурно-геоморфологических исследований (рис. 2б), но при этом позволяет сузить площадь участков, рекомендованных к бурению.



**Рис. 2. Распределение вероятности нефтегазоперспективности по результатам интеграции геопространственных данных**

Наличие или отсутствие залежи углеводородов в прогнозной точке устанавливалась по результатам разведочного бурения. Поскольку достоверных количественных характеристик выявленных залежей углеводородов пока нет, то оценивалась ранговая корреляция между распределением апостериорной вероятности и расположением продуктивных/непродуктивных буровых скважин. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена по данным 13 разведочных буровых скважин составляет 0,786, что свидетельствует о достаточной эффективности проведенной интеграции данных [25].

### Выводы

Таким образом, интеграция дистанционных и геолого-геофизических данных является эффективным и наглядным инструментом комплексной оценки нефтегазоперспективности территорий. Подход к интеграции данных на основе байесовского вероятностного вывода позволяет строить карты пространственного распределения вероятности сходства с известными нефтегазоносными геологическими структурами, которые обеспечивают важную информационную поддержку принятия решений на проведение детальных геологоразведочных работ.

### Литература

1. Genesereth M. Data Integration: The Relational Logic Approach. Stanford: Morgan and Claypool Publishers, 2010. 110 p.
2. Challa S., Koks D. Bayesian and Dempster-Shafer fusion. *Sadhana*. 2004. Vol.29. Part 2. P.145-176.
3. Stathaki T. Image Fusion: Algorithms and Applications. London: Academic Press, 2008. 500 p.
4. Wache H., Vögele T., Visser T., Stuckenschmidt H., Schuster H., Neumann G., Hübner S. Ontology-based integration of information – a survey of existing approaches. *Proceedings of the IJCAI-01 Workshop on Ontologies and Information Sharing*. Seattle: American Association for Artificial Intelligence, 2001. P.108-117.

5. Петровский А.П Ганженко Н.С., Крупский Б.Л., Гладун В.В., Черпиль П.М., Цёха О.Г., Бодлак П.М., Облеков Г.И., Полин И.И. Новые возможности изучения особенностей геологического строения и оценки перспективности нефтегазоносных объектов на основе применения технологии комплекса геолого-геофизических данных. *Геоинформатика*. 2005. № 3. С.24-26.
6. Станкевич С.А. Титаренко О.В. Методика інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних при пошуку нафти та газу. *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского*. 2009. Т.22(61). № 1. С.105-113.
7. Schallehn E. Sattler K.-U., Saake G. Efficient similarity-based operations for data integration. *Data & Knowledge Engineering*, 2004. Vol.48. No.3. P.361-387.
8. Попов М.А., Станкевич С.А., Марков С.Ю., Зайцев А.В., Топольницький М.В., Титаренко О.В. Принципы геоинформационного обеспечения задач дистанционного поиска полезных ископаемых. *Инфраструктура спутниковых геоинформационных ресурсов и их интеграция*. Под ред. М.А. Попова и Е.Б. Кудашева. Киев: Карбон-Сервис, 2013. С.124-142.
9. Davis J.C. *Statistics and Data Analysis in Geology*. New York: John Wiley, 2002. 656 p.
10. Shi C., Wang Y. Nonparametric and data-driven interpolation of subsurface soil stratigraphy from limited data using multiple point statistics. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021. Vol.58. No.2. P.261-280.
11. Wellmann F., Caumon G. 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties. *Advances in Geophysics*. Ed. by C. Schmelzbach. Vol.59. Cambridge: Elsevier, 2018. P.1-121.
12. Попов М.О., Станкевич С.А., Топольницький М.В., Седлорова О.В. Підхід до інтеграції дистанційних та геолого-геофізичних даних на основі теорії свідчень Демпстера-Шейфера. *Доповіді НАН України*, 2015. № 4. С.94-98.
13. Demicco R.V. Fuzzy logic in geological sciences: a literature review. *Fuzzy Logic in Geology*. Ed. by R.V. Demicco and G.J. Klir. San Diego: Academic Press, 2004. P.103-120.
14. Хрущов Д.П., Лобасов А.П., Ковальчук М.С., Ремезова Е.А., Босевская Л.П., Кирпач Ю.В. Целевые экспертные системы геологической направленности. *Геологічний журнал*, 2012. № 2. С.87-99.
15. Li S., Chen J., Xiang J. Applications of deep convolutional neural networks in prospecting prediction based on two-dimensional geological big data. *Neural Computing and Applications*, 2020. Vol.32. No.7. P.2037-2053.
16. Sivarajah U., Kamal M.M., Irani Z., Weerakkody V. Critical analysis of Big Data challenges and analytical methods. *Journal of Business Research*, 2017. Vol.70. No.1. P.263-286.
17. MacKay D.J.C. *Information Theory, Inference & Learning Algorithms*. New York: Cambridge University Press, 2003. 640 p.
18. Станкевич С.А., Буніна А.Я., Чепурний В.С. Оцінка можливості інтеграції геолого-геофізичних та дистанційних геопросторових даних для картування рудоперспективності територій. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. 2014. Вип.6. Київ: Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України. С.53-59.
19. Станкевич С.А., Титаренко О.В. Методика картирования границ залежей углеводородов с использованием данных дистанционного зондирования. *Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса*. Под ред. В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. С.425-430.
20. Попов М.А., Станкевич С.А., Марков С.Ю., Зайцев А.В., Кудашев Е.Б. Интеграция гетерогенной пространственной информации для решения задач поиска нефти и газа. *Электронные библиотеки*, 2013. Т.16. Вып.2. <http://www.elbib.ru/rus/journal/2013/part2/PSMZK>
21. Kullback S. *Information Theory and Statistics*: New York: Dover Publications, 1997. 432 p.

22. Соловьев В.О., Борисовец И.И., Васильев А.Н., Павлов С.Д., Суярко В.Г., Терещенко В.А., Фык И.М., Щербина В.Г. Геология и нефтегазоносность Украины. Харьков: Курсор, 2014. 294 с.
23. Гладун В.В. Перспективи нафтогазоносності Дніпровсько-Донецької газонафтоносної області. *Доповіді НАН України*. 2011. № 8. С.91-96.
24. Лукин А.Е., Довжок Е.М., Книшман А.Ш., Гончаренко В.И., Дзюбенко А.И. Гелиевая аномалия в нефтегазоносных визейских карбонатных коллекторах Днепровско-Донецкой впадины. *Доповіді НАН України*. 2012. № 7. С.97-104.
25. Фёрстер Э., Рёнци Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Пер. с нем. М.: *Финансы и статистика*, 1983. 304 с.

### References

1. Genesereth M., (2010). Data Integration: The Relational Logic Approach: Stanford: Morgan and Claypool Publishers.
2. Challa, S., & Koks, D. (2004). Bayesian and Dempster-Shafer fusion. *Sadhana*, **29**, 2, 145-176.
3. Stathaki, T.(2008). Image Fusion: Algorithms and Applications. London: Academic Press.
4. Wache, H., Vögele, T., Visser, T., Stuckenschmidt, H., Schuster, H., Neumann, G., & Hübner, S. (2001). Ontology-based integration of information – a survey of existing approaches. *Proceedings of the IJCAI-01 Workshop on Ontologies and Information Sharing*. Seattle: American Association for Artificial Intelligence. P.108-117.
5. Petrovskiy, A.P., Ganzhenko, N.S., Krupskiy, B.L., Gladun, V.V., Cherpil, P.M., TsYoha, O.G., Bodlak, P.M., Obekov, G.I., & Polyin, I.I. (2005). Novyie vozmozhnosti izucheniya osobennostey geologicheskogo stroeniya i otsenki perspektivnosti neftegazonosnykh ob'ektov na osnove primeneniya tehnologii kompleksa geologo-geofizicheskikh dannykh. *Geoinformatika*, **3**, 24-26.
6. Stankevych, S.A., & Tytarenko, O.V. (2009). Metodyka intehratsii dystantsiinykh ta heoloho-heofizychnykh danykh pry poshuku nafty ta hazu. *Uchenyye zapysky Tavrycheskoho natsyonalnoho unyversyteta ym. V.Y. Vernadskoho*, **22**(61), 1, 105-113.
7. Schallehn, E., Sattler, K.-U., & Saake, G. (2004). Efficient similarity-based operations for data integration. *Data & Knowledge Engineering*, **48**, 3, 361-387.
8. Popov, M.A., Stankevich, S.A., Markov, S.Yu., Zaytsev, A.V., Topolnitskiy, M.V., & Titarenko, O.V. (2013). Printsipy geoinformatsionnogo obespecheniya zadach dystantsionnogo poiska poleznykh iskopaemykh. *Infrastruktura sputnikovykh geoinformatsionnykh resursov i ikh integratsiya*. Pod red. M.A. Popova i Ye.B. Kudasheva. Kiev: Karbon-Servis, P.124-142.
9. Davis, J.C. (2002). Statistics and Data Analysis in Geology. New York: John Wiley.
10. Shi, C., & Wang, Y. (2021). Nonparametric and data-driven interpolation of subsurface soil stratigraphy from limited data using multiple point statistics. *Canadian Geotechnical Journal*, **58**, 2, 261-280.
11. Wellmann, F., & Caumon, G. (2018). 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties. *Advances in Geophysics*. Ed. by C. Schmelzbach. Cambridge: Elsevier, **59**, 1-121.
12. Popov, M.O., Stankevich, S.A., Topolnitskiy, M.V., & Sedlerova, O.V. (2015). Pidkhid do integratsii dystantsiinykh ta geologo-geofizychnykh danikh na osnovi teorii svidchen Dempstera-Shefpera. *Dopovidi NAN Ukraini*, **4**, 94-98.
13. Demicco, R.V. (2004). Fuzzy logic in geological sciences: a literature review. *Fuzzy Logic in Geology*. Ed. by R.V. Demicco and G.J. Klir. San Diego: Academic Press. P.103-120.
14. Khrushchov, D.P., Lobasov, A.P., Kovalchuk, M.S., Remezova, Ye.A., Bosevskaya, L.P., & Kirpach, Yu.V. (2012). Tselevye ekspertnye sistemy geologicheskoy napravlenosti. *Geologichniy zhurnal*, **2**, 87-99.



15. Li, S., Chen, J., & Xiang, J. (2020). Applications of deep convolutional neural networks in prospecting prediction based on two-dimensional geological big data. *Neural Computing and Applications*, **32**, 7, 2037-2053.
16. Sivarajah, U., Kamal, M.M., Irani, Z., & Weerakkody, V. (2017). Critical analysis of Big Data challenges and analytical methods. *Journal of Business Research*, **70**, 1, 263-286.
17. MacKay, D.J.C. (2003). *Information Theory, Inference & Learning Algorithms*. New York: Cambridge University Press.
18. Stankevych, S.A., Bunina, A.Ia., & Chepurnyi, V.S. (2014). Otsinka mozhlivosti intehtatsii heoloho-heofizychnykh ta dystantsiinykh heoprosorovykh danykh dlia kartuvannia rudoperspektyvnosti terytorii. *Tekhnohenko-ekolohichna bezpeka ta tsyvilnyi zakhyst*. Kyiv: Instytut heokhimii navkolyshnoho seredovyshcha NAN Ukrainy, **6**, 53-59.
19. Stankevich, S.A., & Titarenko, O.V. (2012). Metodika kartirovaniya granits zalezhey uglevodorodov s ispolzovaniem dannykh dystantsionnogo zondirovaniya. *Aerokosmicheskii monitoring ob'ektov neftegazovogo kompleksa*. Pod red. V.G. Bondura. M.: Nauchnyi mir, p.425-430.
20. Popov, M.A., Stankevich, S.A., Markov, S.Yu., Zaytsev, A.V., & Kudashev, Ye.B. (2013). Integratsiya geterogennoy prostranstvennoy informatsii dlya resheniya zadach poiska nefti i gaza. *Elektronnye biblioteki*, **16**, 2. <http://www.elbib.ru/rus/journal/2013/part2/PSMZK>
21. Kullback, S. (1997). *Information Theory and Statistics*: New York: Dover Publications.
22. Solovev, V.O., Borisovets, I.I., Vasilev, A.N., Pavlov, S.D., Suyarko, V.G., Tereschenko, V.A., Fyik, I.M., & Scherbina, V.G. (2014). *Geologiya i neftegazonosnost Ukrainy*. Harkov: Kursor.
23. Hladun, V.V. (2011). Perspektivy naftohazonosnosti Dniprovsko-Donetskoï hazonaftonosnoi oblasti. *Dopovidi NAN Ukrainy*, **8**, 91-96.
24. Lukin, A.E., Dovzhok, E.M., Knishman, A.Sh., Goncharenko, V.I., & Dzyubenko, A.I. (2012). Gelievaya anomalija v neftegazonosnyih vizeyskih karbonatnyih kollektorah Dneprovsko-Donetskoï vpadiny. *DopovIdI NAN Ukrainy*, **7**, 97-104.
25. Fyorster, E., & Ryonts, B. (1983). *Metodyi korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza*. Per. s nem. M.: Finansyi i statistika.

Станкевич Сергей Арсеньевич – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Научного центра аэрокосмических исследований Земли ИГН НАНУ, e-mail: [st@casre.kiev.ua](mailto:st@casre.kiev.ua), ORCID: 0000-0002-0889-5764

Титаренко Ольга Викторовна – к.т.н., ведущий научный сотрудник Научного центра аэрокосмических исследований Земли ИГН НАНУ, e-mail: [olgatitarenko66@ukr.net](mailto:olgatitarenko66@ukr.net), ORCID: 0000-0001-5804-1022

Голубов Станислав Иванович – ведущий инженер Научного центра аэрокосмических исследований Земли ИГН НАНУ, e-mail: [asdfieldspec3@gmail.com](mailto:asdfieldspec3@gmail.com), ORCID: 0000-0003-3711-598X