



УДК 622.831.322.001.18

© 2010

Академик НАН Украины **А. Ф. Булат, В. В. Лукинов,**
Е. М. Киселева, О. Б. Блюсс

Прогнозная оценка выбросоопасности слоев песчаников на основе кластеризации в пространстве геологических данных

Розглянуто задачу класифікації шарів пісковиків за прогнозним ступенем викиднебезпечності з урахуванням геологічних даних. На підставі нечіткої кластеризації з ітераційним перерахунком експоненціальної ваги отримано координати відповідних кластерів у просторі ознак.

Актуальность прогноза газодинамических явлений на угольных месторождениях определяется необходимостью обеспечения безопасного и эффективного ведения горных работ при подземной разработке месторождений на больших глубинах. Однако выполнить прогнозную оценку выбросоопасности пород в полном соответствии с методиками, изложенными в “Правилах ...” [1], не всегда представляется возможным из-за отсутствия полной информации по всем показателям, необходимым для осуществления прогноза. Известные методы прогноза выбросоопасности горных пород ориентированы на использование данных о содержании органической и минеральной составляющих, геолого-геофизического мониторинга и петрофизических данных [2, 3]. Параметры статистических распределений геологических показателей выбросоопасности песчаников используются при оценке критериев выбросоопасности в комплексе с другими характеристиками горных пород [4, 5]. При этом на основе детального изучения связей различных геологических показателей с выбросоопасностью установлен характер статистических распределений значений этих показателей для выбросоопасных и выбросонеопасных пород.

Несомненно, более оправданным при реализации методологии прогноза выбросоопасности является альтернативный к подходу, основанному на использовании статистических зависимостей, метод кластеризации горных пород по ограниченному количеству геофизических и петрофизических показателей, позволяющий отнести их к кластерам K1, K2, K3

по следующей классификации: выбросоопасные, слабо выбросоопасные и выбросонеопасные соответственно, что является актуальной научной задачей.

Ниже предлагается использование нечеткой кластеризации, что позволяет с определенной степенью надежности отнести анализируемые по выбросоопасности горные породы к каждому из указанных кластеров. Одним из эффективных методов нечеткой кластеризации является метод c -средних [6], где в качестве целевого функционала рассматривается сумма взвешенных квадратов отклонений координат классифицируемых объектов от центров кластеров:

$$J_m(U, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^m \|x_k - v_i\|^2, \quad (1)$$

где m — экспоненциальный вес нечеткой кластеризации ($m > 1$); $x_k = \{x_k^1, \dots, x_k^q\}$ — k -й из объектов, подлежащих кластеризации (номер породного пласта), представленный вектором признаков, характеризующим параметры пласта (q — количество признаков); v_i — центр i -го кластера, представленный вектором размерности q ; n — количество объектов; c — количество кластеров. Величина u_{ik} отражает степень принадлежности k -го объекта i -му кластеру, причем

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1; \quad 1 \leq k \leq n. \quad (2)$$

В результате решения задачи минимизации функционала (1) относительно переменных U, v при ограничениях (2) в публикации [6] были получены формулы пересчета степеней принадлежности

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|x_k - v_i\|}{\|x_k - v_j\|} \right)^{2/(m-1)}}; \quad 1 \leq i \leq c; \quad 1 \leq k \leq n \quad (3)$$

и центров кластеров

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^m}; \quad 1 \leq i \leq c, \quad (4)$$

на основе которых был предложен алгоритм нечеткой кластеризации методом c -средних. В приведенных зависимостях u_{ik} — степень принадлежности анализируемого пласта к конкретному кластеру по выбросоопасности; x_k — характеристики пласта; v_i — координаты центра кластера.

В рассмотренном нами ниже примере кластеризации слоев песчаников учитывались признаки ($q = 5$) из следующих диапазонов: кварц обломочный — от 36,0 до 76,5%; кварц регенерационный — от 0 до 8%; глинисто-слюдистые минералы — от 5,5 до 27,0%; средний диаметр — от 0,11 до 0,40 мм; пористость открытая — от 2,00 до 17,46%.

Результаты кластеризации методом c -средних [6], основанном на формулах (3), (4), позволили получить следующие значения координат центров кластеров в признаковом пространстве:

$$V = \begin{pmatrix} K1 \\ K2 \\ K3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 59,82 & 4,26 & 15,12 & 0,28 & 9,76 \\ 55,46 & 1,44 & 14,50 & 0,16 & 4,92 \\ 58,98 & 1,93 & 19,17 & 0,17 & 8,70 \end{pmatrix}.$$

Следует отметить, что в этом случае, принадлежность горных пород кластерам K1, K2, K3 определяется на основе матрицы степеней принадлежности, а также на уже известном прогнозе для конкретных горных пород.

Таким образом, при принятии решения относительно прогнозной оценки выбросоопасности горных пород с учетом характеристик нового породного пласта необходимо определиться в степенях принадлежности породного пласта к соответствующим кластерам, для чего следует рассчитать в признаковом пространстве расстояние от вектора признаков породного пласта до соответствующих центров кластеров. При вычислении целевого функционала, пересчете координат центров кластеров и степеней принадлежности используется рекомендованное значение экспоненциального веса $m = 2$. Однако в настоящее время отсутствует обоснование выбора значения этого параметра. В данной работе с учетом полученных нами результатов [7, 8] предложено на каждой итерации нечеткой кластеризации определять значение m исходя из решения задачи многокритериальной оптимизации, состоящей в минимизации линейной свертки критериев:

$$\min_{m \in \mathbb{R}} Q(U) = a \cdot J_m(U, v) + (1 - a) \cdot S(U), \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (\text{константа}), \quad (5)$$

где $J_m(U, v)$ — функционал (1), а $S(U)$ — информационная энтропия, вычисляемая, согласно выражению

$$S(U) = - \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik} \cdot \ln(u_{ik}). \quad (6)$$

Проведенные численно-аналитические исследования на указанном выше экспериментальном материале позволили получить для центров кластеров следующие координаты в признаковом пространстве:

$$V = \begin{pmatrix} K1 \\ K2 \\ K3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 61,74 & 4,6 & 12,66 & 0,21 & 9,08 \\ 55,92 & 1,5 & 15,58 & 0,12 & 5,19 \\ 59,82 & 2,0 & 20,5 & 0,14 & 11,80 \end{pmatrix},$$

причем экспоненциальный вес на каждой итерации предложенного алгоритма выбирался с учетом данных [6] в интервале $[1,1; 10]$. Отметим, что в обоих подходах к нечеткой кластеризации параметров породных пластов, исходя из анализа матриц степеней принадлежности и априорной информации о выбросоопасности, кластерам K1, K2, K3 отвечают соответствующие прогнозные оценки, отмеченные ранее.

Описанный в работе [6] метод c -средних, а также подход к кластеризации, предложенный авторами, сравнивались на основе следующих индексов [9]:

предложенный Дж. Беждеком коэффициент разделения

$$I_{PC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^2,$$

где чем выше его значение, тем эффективнее кластеризация данных; индекс Кси-Бени:

$$I_{XB} = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ij}^m \|x_k - v_i\|^2}{n \min_{ij} \|v_j - v_i\|^2}.$$

Числитель отражает компактность нечеткого разделения, а знаменатель — качество разделения между кластерами. Следовательно, минимальному значению I_{XB} соответствует высокое качество кластеризации.

Для полученных результатов кластеризации параметров горных пород на основе функционала Беждека и предложенного авторами векторного критерия (5) вышеназванные индексы принимают такие значения:

трехкластерное разбиение, полученное по методу c -средних: $I_{PC} = 0,551$; $I_{XB} = 0,55$;

трехкластерное разбиение, полученное по модификации метода c -средних с пересчетом экспоненциального веса: $I_{PC} = 0,575$; $I_{XB} = 0,24$.

Таким образом, при прогнозной оценке выбросоопасности песчаников с учетом недостаточного для осуществления прогноза по существующим методам [1] количества исходных данных целесообразно использование методов нечеткой кластеризации. Полученные значения индексов позволили сделать вывод о целесообразности применения метода нечеткой кластеризации на основе линейного векторного критерия с итерационным пересчетом экспоненциального веса, что обеспечивает более высокое качество классификации породных пластов и прогнозную оценку выбросоопасности.

1. *Правила* ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. СОУ 10.1.00174088. 011-2005. – Чинний від 2006-04-01. – Київ: Мінвуглепром України, 2005. – 222 с.
2. Булат А. Ф., Звягильский Е. Л., Лукинов В. В., Перепелица В. Г., Пимоненко Л. И., Шевелев Г. А. Угленородный массив Донбасса как гетерогенная среда. – Киев: Наук. думка, 2008. – 411 с.
3. Забигаило В. Е., Лукинов В. В., Широков А. З. Выбросоопасность горных пород Донбасса. – Киев: Наук. думка, 1983. – 288 с.
4. Николин В. И., Лысиков Б. А., Ткач В. Я. Прогноз выбросоопасности угольных и породных пластов. – Донецк: Донбасс, 1972. – 127 с.
5. Абрамов Ф. А., Шевелев Г. А. Свойства выбросоопасных песчаников как породы-коллектора. – Киев: Наук. думка, 1972. – 98 с.
6. Bezdek J. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. – New York: Plenum Press, 1981. – 260 p.
7. Киселева Е. М., Блосс О. Б. Использование энтропии Реньи в методах нечеткой кластеризации // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. “Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем” – Дніпропетровськ, 2008. – С. 156.
8. Киселева Е. М., Блосс О. Б. Особенности некоторых алгоритмов многокритериальной нечеткой кластеризации // Питання прикладної математики і математичного моделювання. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 86–92.

9. *Weina Wang, Yunjie Zhang*. On fuzzy cluster validity indices // Fuzzy Sets and Systems. – 2007. – **158**. – P. 2095. – 2117.

*Институт геотехнической механики
им. Н. С. Полякова НАН Украины, Днепрпетровск
Днепрпетровский национальный университет
им. Олеся Гончара*

Поступило в редакцию 12.03.2010

Academician of the NAS of Ukraine **A. F. Bulat, V. V. Lukinov, E. M. Kiseleva, O. B. Blyuss**

Forecast estimate of burst hazard of sandstone layers using their clustering in the space of geological data

This work considers the problem of the sandstone layer classification with respect to their burst hazard using geological data. With the help of fuzzy clustering with an iterative update of an exponential weight, the coordinates of the corresponding centers of clusters in the space of parameters are determined.