

Л.Л. Кауфман, канд. техн. наук,  
Б.А. Лысиков, канд. техн. наук  
(ДонНТУ)

И.Ж.Сирачев, инж.  
(ГОО «Трест Донецкшахтопроходка»)

## **ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ ПОРОД ПРИ СООРУЖЕНИИ ТУННЕЛЕЙ**

Наведено закордонний досвід застосування штучної нейронної моделі, яка дозволяє перекваліфікувати появу та інтенсивність викидів.

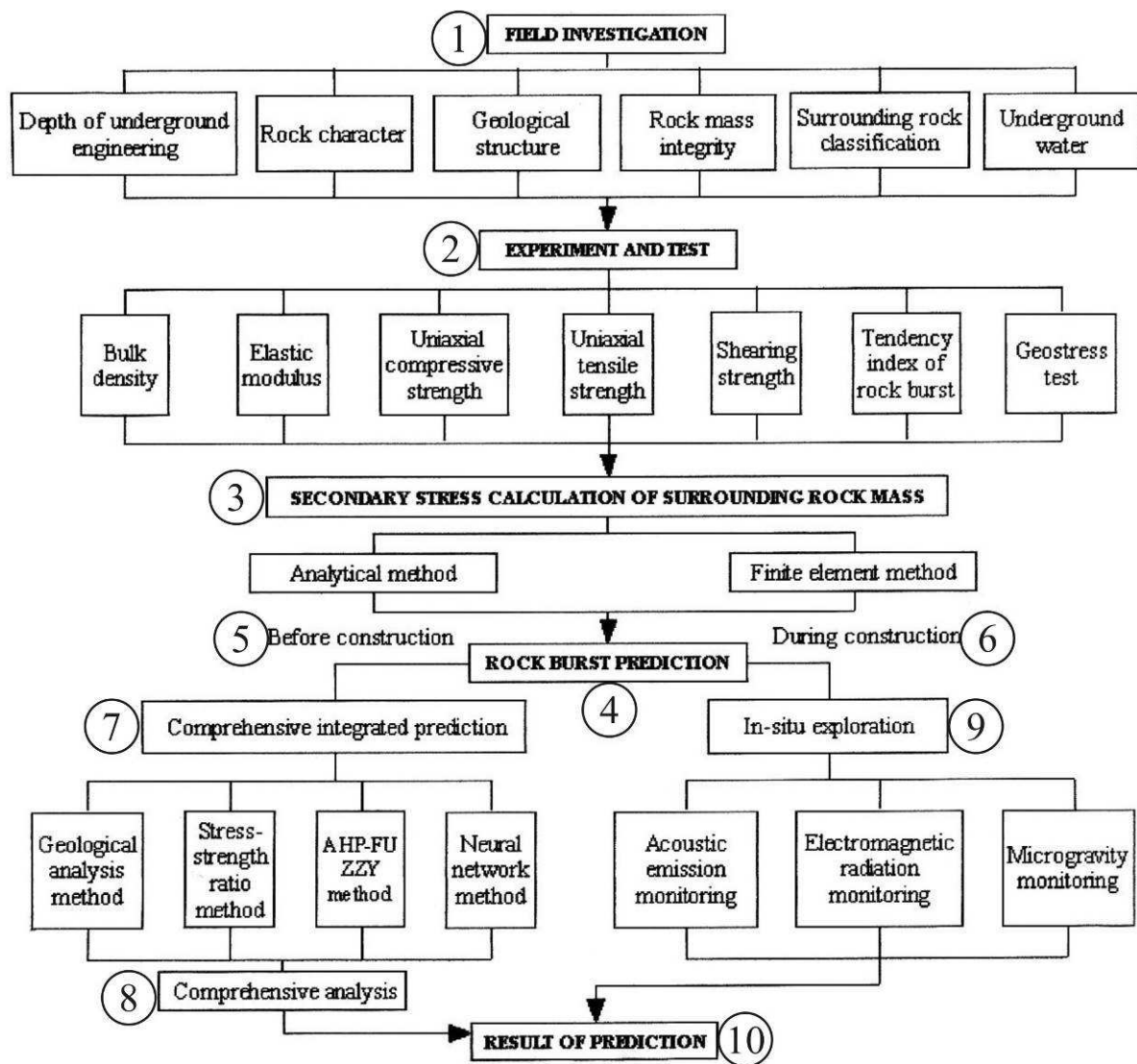
## **WORLDWIDE EXPERIENCE OF ROCKBURSTS PREDICTION IN TUNNEL CONSTRUCTION**

There is description of worldwide experience of rockbursts prediction by artificial neural network in tunnel construction.

Внезапные выбросы пород рассматриваются, как явления динамической неустойчивости окружающих породных масс в условиях высоких геостатических напряжений. Выбросы представляют собой внезапное высвобождение потенциальной энергии напряжений породного массива. Поскольку он происходит мгновенно и интенсивно, выброс часто является причиной травм персонала (включая смертельные случаи), повреждений оборудования и вызывает существенные задержки производственной деятельности или срыв срока строительства, приводит к экономическому ущербу.

Из-за сложности строения породных масс и влияния окружающих природных факторов прогнозирование внезапных выбросов пород в дизайне подземных проектов всегда проблематично. Общий подход к этой задаче показан на рис. 1[1].

Одним из новых методов решения этой задачи служит применение искусственной нейронной модели, позволяющей предсказать появление и интенсивность выбросов. Согласно сайту Интернета «Wapedia», (<http://wapedia.mobi/ru/%D0%98%D1%81%D0%BA%...>), «искусственные нейронные сети – математические модели, а также их программные реализации, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей нервных клеток живого организма. Искусственная нейронная сеть представляет собой систему соединенных и взаимодействующих процессоров (искусственных нейронов). Такие процессоры обычно довольно просты, особенно в сравнении с используемым в персональных компьютерах.



1 – полевые исследования: глубина подземных работ, характеристика пород, геологическая структура, интегрированность породных масс, классификация окружающих пород, подземные воды; 2 – эксперименты и испытания: объемный вес, модуль упругости, прочность на осевое сжатие, прочность на осевое растяжение, прочность на срез, индекс тенденции к выбросу пород, испытание геологических напряжений; 3 – расчет вторичных (индуцированных) напряжений окружающих породных масс: аналитический метод, метод конечных элементов; 4 – прогнозирование внезапных выбросов пород; 5 – до строительства; 6 – в ходе строительства; 7 – полное интегрированное прогнозирование: метод геологического анализа, метод соотношения «напряжение/прочность», метод АНП – Analytical Hierarchy Process – разработка решений, основанных на структурировании альтернатив в соответствии с иерархией взвешенных критериев множественного выбора (multiple choice), метод искусственной нейронной сети; 8 – обобщенный анализ; 9 – исследования в массиве: мониторинг акустической эмиссии, мониторинг электромагнитной эмиссии, мониторинг микрогравитации; 10 – результат прогнозирования.

Рис. 1 – Общий подход к прогнозированию внезапных выбросов пород

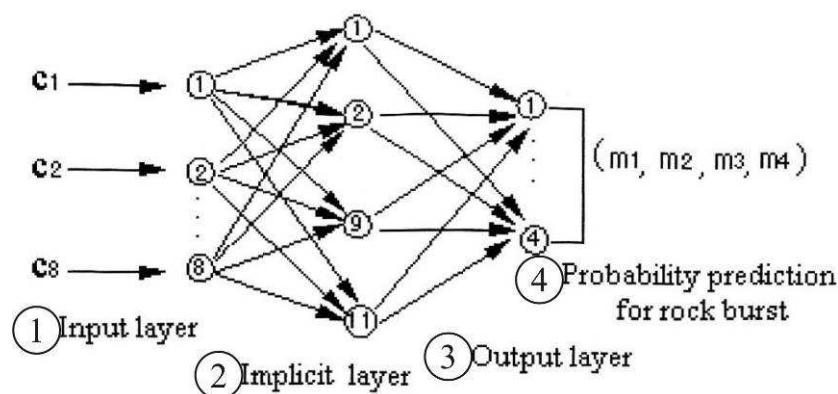
Каждый процессор подобной сети имеет дело только с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые он периодически посылает другим процессорам.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова – они обучаются. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, а также выполнять обобщения».

Нейронная сеть состоит из множества функционирующих элементов, соединенных друг с другом в соответствии с определенными правилами, способных воспринять внешнюю информацию и динамично ответить на нее.

Метод прогнозирования вероятности возникновения внезапного выброса пород с использованием искусственной нейронной сети учитывает различные значения напряжений и их сложные нелинейные отношения в породном массиве, окружающем подземную полость. Главная идея алгоритма состоит в построении схемы связей известных параметров с возможными результатами и в получении прогноза ожидаемого результата.

Подробное описание последовательности построения нейронной сети прогнозирования внезапных выбросов пород выходит за рамки данной книги. На рис. 2 приводится методический пример такой сети, в которой входными параметрами  $C$  служат критерии выбросоопасности. Результатами прогнозирования вероятности выбросов служат параметры:  $m_1$  – отсутствия выбросов,  $m_2$  – слабого выброса,  $m_3$  – среднего выброса,  $m_4$  – сильного выброса.

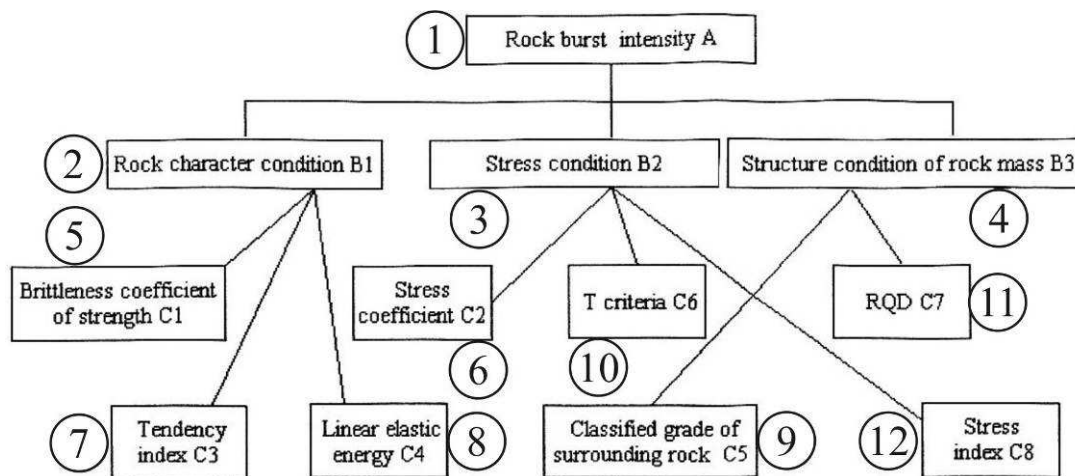


1 – входной уровень; 2 – подразумеваемый уровень; 3 – выходной уровень;  
4 – вероятность прогнозирования внезапного выброса.

Рис. 2 – Схема сетевой структурной модели искусственной нейронной сети прогнозирования внезапных выбросов пород

При реализации искусственной нейронной сети оцениваемые факторы (критерии выбросоопасности) относятся к трем аспектам: свойства пород, условия напряжений и структурные особенности породных масс. Свойства пород включают коэффициент хрупкости  $C_1$  (brittleness coefficient of strength), индекс тенденции к выбросу  $C_3$  (tendency index), показатель линейной упругой энергии  $C_4$  (linear elastic energy). Фактор условий напряжений включает коэффициент напряжений  $C_2$  (stress coefficient), критерий Т трещиноватости пород  $C_6$  (T criteria)

и индекс напряжений  $C_8$  (stress index). К структурным особенностям породных масс относятся классификация пород  $C_5$  (grade of surrounding rock) и значение RQD (rock quality designation) – показатель качества пород  $C_7$  (рис. 3).



1 – интенсивность внезапного выброса – A; 2 – характеристика породных условий – B<sub>1</sub>; 3 – условия напряжений – B<sub>2</sub>; 4 – структурные условия породных масс B<sub>3</sub>; 5 – коэффициент хрупкости C<sub>1</sub>; 6 – коэффициент напряжений C<sub>2</sub>; 7 – индекс тенденции к выбросу C<sub>3</sub>; 8 – показатель линейной упругой энергии C<sub>4</sub>; 9 – степень классификации окружающих пород – C<sub>5</sub>; 10 – критерий Т трещиноватости пород C<sub>6</sub>; 11 – показатель качества пород RQD; 12 – индекс напряжений C<sub>8</sub>.

Рис. 3 – Модель иерархической структуры для прогнозирования интенсивности внезапных выбросов пород

Перечисленные факторы взаимозависимы и взаимно ограничены. Они совместно определяют возможность выброса и его интенсивность. Но только после анализа нейронной сети можно решить, какие факторы играют главные роли и как оценить уровень их влияния на выбросы пород.

В табл.1 сведены критерии оценки влияния факторов (рассчитанных методами механики горных пород) на интенсивность выброса, а в табл.2 – значения этих факторов на конкретных участках длины коммуникационного туннеля гидростанции Yalong River, Китай, где для прогнозирования вероятности выбросов пород применялась искусственная нейронная сеть.

Таблица 1 – Критерии оценки влияния факторов на интенсивность выброса пород

Фактор	Критерии выбросоопасности	Интенсивность выброса			
		отсутствует	слабый	средний	сильный
C <sub>1</sub>	Коэффициент хрупкости	> 40	40-26,7	26,7-14,5	< 14,5
C <sub>2</sub>	Коэффициент напряжений	< 0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	> 0,7
C <sub>3</sub>	Индекс тенденции к выбросам	< 2,0	2,0-3,5	3,5-5,0	> 5,0
C <sub>4</sub>	Показатель линейной упругой энергии	< 40	40-100	100-200	> 200
C <sub>5</sub>	Классификация пород	-	II-III	II-I	I
C <sub>6</sub>	Критерий Т трещиноватости пород	< 0,3	0,3-0,5	0,5-0,8	> 0,8
C <sub>7</sub>	Показатель качества пород	< 0,25	0,25-0,5	0,5-0,7	> 0,7
C <sub>8</sub>	Индекс напряжений	< 0,15	0,15-0,2	0,20-0,25	> 0,25

Таблица 2 – Результаты прогнозирования вероятности выбросоопасности на различных участках длины коммуникационного туннеля

Номера участков	Маркшейдерская маркировка участков	Входные параметры (критерий выбросоопасности)								Результаты прогноза			
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>
1	K0+000~K0+692	24,0	0,15	1,5	145	3,0	0,25	0,76	0,14	1,000	0,000	0,000	0,000
2	K0+692~K2+500	25,2	0,45	2,4	177	2,5	0,52	0,79	0,21	0,881	0,083	0,039	0,000
3	K14+690~K15+138	24,4	0,6	3,2	196	2,5	0,71	0,89	0,27	0,7946	0,1214	0,084	0,000
4	K15+138~K16+410	25,0	0,4	3,0	189	2,5	0,49	0,79	0,19	0,8052	0,1178	0,077	0,000
5	K16+410~K17+230	23,8	0,15	2,5	181	3,0	0,27	0,69	0,15	1,000	0,000	0,000	0,000
6	K0+000~K0+485	23,7	0,15	2,5	176	3,0	0,24	0,75	0,14	1,000	0,000	0,000	0,000
7	K0+485~K1+511	23,9	0,34	3,0	179	2,5	0,49	0,81	0,19	0,748	0,172	0,080	0,000
8	K1+511~K2+480	24,1	0,41	3,1	180	2,5	0,55	0,84	0,24	0,636	0,267	0,097	0,000
9	K2+480~K4+168	24,3	0,6	3,2	191	2,5	0,73	0,87	0,27	0,7635	0,1073	0,1292	0,000
10	K14+615~K15+815	24,2	0,67	3,3	193	2,5	0,78	0,94	0,27	0,804	0,051	0,057	0,088

Применявшиеся в описанном исследовании критерии выбросоопасности, показанные в табл.1, не являются единственными при изучении проблем природы и прогнозирования внезапных выбросов пород. В табл.3 сведены результаты других авторов, позволяющие с разной степенью адекватности предвидеть поведение пород при создании в них полостей добычных или строящихся [2].

Таблица 3 – Критерии выбросоопасности пород

Автор	Критерий выбросоопасности	Прогноз выбросоопасности
1	2	3
L. Rusenses	$\sigma_{\theta}/\sigma_c < 0,20$ $0,20 \leq \sigma_{\theta}/\sigma_c < 0,30$ $0,30 \leq \sigma_{\theta}/\sigma_c < 0,55$ $\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,55$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс
A. Turcha-ninov	$(\sigma_{\theta} + \sigma_L)/\sigma_c \leq 0,3$ $0,3 < (\sigma_{\theta} + \sigma_L)/\sigma_c \leq 0,5$ $0,5 < (\sigma_{\theta} + \sigma_L)/\sigma_c \leq 0,8$ $(\sigma_{\theta} + \sigma_L)/\sigma_c > 0,8$	выброс не ожидается вероятный выброс ожидаемый выброс сильный выброс
E. Hoek	$\sigma_{\theta}/\sigma_c = \begin{cases} 0,34 \\ 0,42 \\ 0,56 \\ 0,70 \end{cases}$	легкое расслоение сильное расслоение усиленная крепь сильный выброс
N. Barton	$\sigma_d/\sigma_1 = 5 - 2,5$ $\sigma_d/\sigma_1 < 2,5$	средний выброс сильный выброс
Z. Tao	$\sigma_d/\sigma_1 > 14,5$ $5,5 < \sigma_d/\sigma_1 \leq 14,5$ $2,5 \leq \sigma_d/\sigma_1 < 5,5$ $\sigma_d/\sigma_1 < 2,5$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс
F. Hou	$\sigma_1 < \sigma_c < 0,30$ $0,30 \leq \sigma_1/\sigma_c < 0,37$ $0,37 \leq \sigma_1/\sigma_c \leq 0,62$ $\sigma_1/\sigma_c > 0,62$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс

1	2	3
J. Lu	$\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,3 \quad \sigma_t/\sigma_{\theta} = 0,25$ $\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,4 \quad \sigma_t/\sigma_{\theta} = 0,50$ $\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,5 \quad \sigma_t/\sigma_{\theta} = 0,75$ $\sigma_{\theta}/\sigma_c \geq 0,6 \quad \sigma_t/\sigma_{\theta} = 1,0$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс
С. Haijun	$W_{qx} < 1,5 \quad \sigma_1 < \sigma_c/\sqrt{\alpha W_{qx}}$ $W_{qx} \leq 2,5$ $\sigma_1 \leq 1,41\sigma_c/\sqrt{\alpha W_{qx}}$ $W_{qx} \leq 3,5$ $\sigma_1 \leq 1,73 \quad \sigma_c/\sqrt{\alpha W_{qx}}$ $W_{qx} > 3,5$ $\sigma_1 > 1,73 \quad \sigma_c/\sqrt{\alpha W_{qx}}$	выброс не ожидается слабый выброс средний выброс сильный выброс

В табл. 3:

- $\sigma_{\theta}$  – тангенциальное напряжение;  
 $\sigma_c$  – прочность породы на сжатие;  
 $\sigma_t$  – прочность породы на растяжение;  
 $\sigma_L$  – литологическая составляющая;  
 $W_{qx}$  – индекс тенденции пород к выбросу;  
 $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение;  
 $\sigma_2$  – среднее главное напряжение;

$$\alpha = 1 + \varepsilon^2 - 2\mu\varepsilon,$$

где  $\varepsilon = \sigma_2 / \sigma_1$ ,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Описанный метод прогнозирования внезапных выбросов пород с построением искусственной нейронной сети позволяет оценить вероятность выброса, используя оценки свойств пород, условий напряжений и структурных особенностей массива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T.Li. Comprehensive integrated methods of rockburst prediction in underground engineering. [http://www.iaeg.info/iaeg2006/PAPER/IAEG\\_594.PDF](http://www.iaeg.info/iaeg2006/PAPER/IAEG_594.PDF)
2. С.Haijun. Prediction of rockburst by artificial neural network. <http://www.rock-mech.org/qikan/manage/wenzhang/2003-05-14.pdf>