

*А. А. Басаргин<sup>1\*</sup>*

## **Применение искусственной нейронной сети для прогнозирования и оптимизации последствий взрывов горных массивов**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: abaspirant@mail.ru

**Аннотация.** Бурение и взрывные работы хорошо известны как основные методы, используемые для выемки горных пород в горнодобывающей промышленности и связанных с ними строительных проектах, таких как туннели и строительство дорог. Буровзрывные работы остаются предпочтительным методом разрушения массива горных пород в горнодобывающих и строительных проектах по сравнению с другими методами с точки зрения экономики и производительности. Однако при разрушении горного массива используется не более 30 % энергии взрыва, а около 70 % теряется в виде отходов, что оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Прогнозирование ударов, вызванных взрывом, является рекомендуемым решением для оптимизации взрывных работ для повышения эффективности защиты окружающей среды. Искусственные нейронные сети (ИНС) могут быть использованы в качестве подхода для разработки вычислительной модели фрагментации, вызванной взрывом, и других воздействий. Применение искусственной нейронной сети для прогнозирования взрывных событий является практическим способом оптимизации проведения взрывных работ с уменьшением нежелательных эффектов. В статье исследовано применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования фрагментации горных пород и некоторых эффектов, вызванных взрывом, включая летучие породы, вибрацию грунта и обратное разрушение.

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, прогнозирование фрагментации горных пород, флайрок, вибрация земли, оптимизация взрывных работ

*А. А. Basargin<sup>1\*</sup>*

## **The use of an artificial neural network for predicting and optimizing the consequences of explosions of mountain ranges**

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: abaspirant@mail.ru

**Abstract.** Drilling and blasting are well known as the main methods used to excavate rock in the mining industry and associated construction projects such as tunnels and road construction. Drilling and blasting remains the preferred method of rock mass destruction in mining and construction projects over other methods in terms of economics and productivity. However, during the destruction of the mountain range, no more than 30% of the energy of the explosion is used, and about 70% is lost in the form of waste, which has a negative impact on the environment. Prediction of shocks caused by an explosion is a recommended solution for optimizing blasting operations to improve the efficiency of environmental protection. Artificial neural networks (ANNs) can be used as an approach to develop a computational model for explosion-induced fragmentation and other impacts. The use of an artificial neural network to predict explosive events is a practical way to optimize blasting operations while reducing undesirable effects. This article explores the application of artificial neural net-

works to predict rock fragmentation and some of the effects caused by an explosion, including volatile rocks, ground vibration, and reverse failure.

**Keywords:** artificial neural network, rock fragmentation prediction, flyrock, earth vibration, blasting optimization

### *Введение*

Взрывные работы играют важную роль для распределения извлеченных фрагментов по размерам. Разрушение горной массы является целью взрывных работ. Таким образом произведенная фрагментация может снизить эксплуатационные расходы за счет обеспечения плавного потока извлеченных материалов при транспортировке, дроблении и других последующих процессах. По сравнению с затратами на механическое разрушение, на которые приходится 40 – 60 % общих затрат на горно-измельчительные работы, использование энергии взрыва для разрушения горных пород является более экономически предпочтительным и эффективным вариантом.

Надлежащее управление процессами взрывных работ приводит к получению подходящей взорванной породы, что оптимизирует экономические показатели горного производства. Например, транспортировка вынуженного материала, которая является неотъемлемой и наиболее затратной частью горных работ, может быть более эффективной за счет повышения качества дробления горных пород [1-4].

Взрывные работы, контролирующие качество и количество образующихся осколков, снижают общие затраты и устраняют неблагоприятные воздействия на окружающую среду, которые обычно сопровождают взрывные работы, такие как обратное разрушение, вибрация, пыль, летящие камни и шум.

Поэтому для целей оптимизации фрагментов была применена прогнозирующая модель фрагментации породы в зоне взрывных работ, основанная на многочисленных входных параметрах: расстояние, нагрузка, диаметр отверстия, взрывчатые вещества (химический состав), высота уступа, забойка, детонация и свойства горной массы, и др.

Геометрические параметры широко используются в качестве входных данных для прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети (ИНС) последствий взрыва.

В последние годы искусственные нейронные сети применялись в качестве подхода для разработки вычислительной модели прогнозирования последствий взрывов для оптимизации перед проведением взрывных работ на горных или связанных с ними строительных объектах [5-10].

### *Применение ИНС во взрывных работах*

За последние несколько лет метод искусственных нейронных сетей привел к технической революции в горнодобывающей промышленности и смежных отраслях. Помимо возможности решать сложные инженерные задачи, прогнозирование ИНС может применяться в широком спектре приложений в горнодобывающей промышленности. Нейронные сети могут предоставлять численные реше-

ния в различных операциях по добыче полезных ископаемых, таких как интерпретация геофизических данных, переработка полезных ископаемых, выбор оборудования, метод подземной разработки, оптимизация взрывных работ, воздействие взрывных работ на окружающую среду и т.д.

Необходимость проведения взрывных работ вызывает опасения по поводу безопасности и негативно влияет на окружающую среду. В качестве инструмента оптимизации метод искусственной нейронной сети имеет возможность прогнозировать нежелательные воздействия, вызванные взрывными работами, включая раскачку, вибрацию грунта и обратное разрушение.

Летучие породы являются опасным явлением при проведении взрывных работ на открытых горных разработках. Для их учета были разработаны несколько прогнозных эмпирических моделей для контроля и устранения опасностей летучей породы. Метод искусственной нейронной сети использовался в качестве нового подхода к контролю летучей породы.

Исследование касалось 192 наборов данных о взрывах на железном руднике. В искусственной нейронной сети применили прямое распространение (три слоя) для девяти входов, 13 скрытых нейронов и одного выхода (флайрок). Результаты показали, что образование летучих пород сведено к минимуму по расстоянию разлета со 165 м до 25 м. И на основании полученных результатов можно сделать вывод, что искусственная нейронная сеть с оптимальной архитектурой 9-13-1 и среднеквадратичной ошибкой 0,67 м может быть эффективно использована в качестве интеллектуального инструмента для прогнозирования и контроля летучих пород в данном исследовании [6-9].

Таким образом, искусственная нейронная сеть с оптимальной архитектурой 9-13-1 и среднеквадратичной ошибкой 0,67 м может быть эффективно использована в качестве интеллектуального инструмента для прогнозирования и контроля летучих пород.

Кроме того, метод ИНС с данной архитектурой может давать точные прогнозы по сравнению с эмпирическими методами, поддерживаемыми очень высоким коэффициентом корреляции (около 0,92) и низким значением системы ошибок (около 0,04%).

Данное исследование показало, что ИНС с эмпирическими результатами является лучшим подходом для прогнозирования вибрации, вызванной взрывными работами.

Наконец, исследование показало, что искусственная нейронная сеть является удобным инструментом оптимизации и может повысить эффективность взрывных работ на карьерах [10-12].

### ***Прогноз фрагментации горных пород***

Взрывные работы за счет полученной фрагментации имеют большое значение в горнодобывающих и связанных с ними проектах выемки горных пород, поскольку они напрямую влияют на производительность и общие затраты на последующие операции. За три десятилетия в развитии технологии взрывных работ

были предприняты серьезные попытки ввести сложное прогнозирование производительности взрывных работ.

Прогнозирование осколков, вызванных взрывом, является важным аспектом оптимизации производства взрывных работ для снижения общих затрат. Однако многочисленные факторы, такие как геотехнические параметры горных пород, свойства взрывчатых веществ и геометрические параметры взрывных работ, могут влиять на разрушение горных пород и определять эффективность прогнозирования.

Так как существует большое количество переменных параметров, влияющих на разрушение горных пород и сложность их взаимосвязи, разработать комплексную формулу невозможно [13].

В последнее время искусственные нейронные сети можно использовать в качестве новой и надежной технологии при взрывных работах. Таким образом, они успешно преодолели недостатки прогнозирования эмпирических моделей. Несмотря на ускоренное развитие приложений для прогнозирования событий, вызванных взрывами, прогнозирование результирующей фрагментации горных пород остается наиболее серьезной проблемой.

В настоящее время искусственная нейронная сеть (ИНС) часто применяется в этой области из-за ее высокой способности решать инженерные задачи. Разработка точно прогнозируемой модели фрагментации горных пород в значительной степени способствует достижению эффективности взрывных работ за счет оптимальной схемы взрыва. Следовательно, это способствует производительным операциям, вызванным взрывными работами, и безопасным процедурам добычи полезных ископаемых или других земляных работ [14].

Для оптимальной идентификации сети пробовались многие топологии, а затем выбрали четыре уровня с архитектурой 10-9-7-1 в качестве оптимальной модели сети на основе наименьшего значения среднеквадратичной ошибки, и высокого значения коэффициента определения ( $R^2$ ).

Предложенную модель протестировали на 10 наборах данных и выполнили тест на чувствительность (метод косинусной амплитуды) для распознавания наиболее чувствительных входных параметров, влияющих на фрагментацию породы. Полученные значения RMSE и  $R^2$  были равны 0,56 м и 0,97 м соответственно. А результаты испытаний на чувствительность показали, что входные параметры, включая нагрузку, пороховой фактор, показатель взрывной способности и заряд на задержку, значительно влияют на фрагментацию породы [15-16].

Согласно полученным результатам, можно сделать вывод, что возможности модели, разработанной нейронной сетью, превосходят возможности многомерной регрессионной модели.

Полученные результаты показывают, что метод искусственной нейронной сети обладает высокой точностью в прогнозировании фрагментации.

### ***Заключение***

В заключение хотелось бы сказать, что искусственная нейронная сеть представляет один из наиболее распространенных методов машинного обучения в об-

ласти прогнозирования последствий взрывов. Это достигается за счет оптимизации взрывных работ в горнодобывающей промышленности или строительных проектах.

Примечательно, что нейронная сеть улучшила желаемую мощность взрыва и свела к минимуму нежелательное воздействие, тем самым повысив производительность, снизив эксплуатационные расходы и контролируя неблагоприятное воздействие на безопасность и окружающую среду. Входные параметры, включая нагрузку, расстояние, забойку, диаметр отверстия, пороховой фактор и заряд на задержку, являются наиболее важными параметрами, влияющими на результаты, вызванные взрывом.

Ограничения прогностических моделей, разработанных методом ИНС, заключаются в узком масштабе применения, поскольку он разработан с учетом условий и свойств конкретной местности и не может широко применяться в других местах.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черагина Д. И. Управления проектами обустройства на примере куста скважины №221 Вынгапурского месторождения // В сборнике: управление социально-экономическими системами: теория, методология, практика сборник статей Международной научно-практической конференции: в 2 частях. – 2017. – С. 24–27.
2. Басаргин А. А. Создание цифровых моделей месторождений полезных ископаемых с применением современных технологий // Вестник СГГА. – №1 (25). – 2014 г. – С. 34–40.
3. Басаргин А. А. Методика создания трехмерных геологических моделей месторождений с использованием геоинформационной системы Micromine // Сборник материалов междунар. Науч. конгр. «ГЕО- Сибирь - 2015». Т. 1 «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», ч.1 – Новосибирск: СГУГиТ, С. 15–20.
4. Урумов В.А., Босиков И.И. 3d-модель и закономерности распределения полезных компонентов залежи Анненская жезказганского месторождения // Устойчивое развитие горных территорий. – 2015. – т. 7. № 1. С. 11–16.
5. Шульга Е. С. Чем порадует 2018 год пользователей программы Micromine // Золото и технологии. – 2017. – № 4 (38). С. 50–53.
6. Осипов В. Л. Определение рудных интервалов при подсчете запасов в программе Micromine // Горные науки и технологии. – 2018. – № 2. С. 23–31.
7. Шевкун Е. Б., Лещинский А. В., Галимьянов А. А. Короткая комбинированная забойка взрывных скважин высокой запирающей способности. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 4. – С. 331–336.
8. Свод Правил СП 47.13330.2012 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. МИНИСТЕРСТВО РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ/М.:2012 г;
9. Нурмухаметова А. Т. 3-х мерное моделирование при подсчете объемов полезного ископаемого // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина. – Томск, 2017. – С. 582–583.
10. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Бедарев А. С., Даулетова А. О. Исследование возможности 3D моделирования для маркшейдерского обеспечения ведения горных работ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. – С. 178–183.

11. Khandelwal, M.; Singh, T. Blast Induced Ground Vibration Prediction Using an Artificial Neural Network. *International J. Rock Meh. Min. scientific* 2009, 46, 1214–1222. [Google Scholar] [Cross Reference]
12. Mutinda, E.; Alunda, B.; Maina, D.; Kasomo, R. Prediction of rock fragmentation using the Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony model. *J. South. fr. Inst. Min. Met.* 2021, 121, 107–112. [Google Scholar] [Cross Reference]
13. Ebrahimi, E.; Mongesi, M.; Khalesi, MR; Armagani, D.J. Prediction and optimization of reverse fracturing and fragmentation of rocks using an artificial neural network and a bee colony algorithm. *Bull. English geol. Environment.* 2015, 75, 27–36. [Google Scholar] [Cross Reference]
14. Dekne, PJ; Pradhan, M.; Jade, RK; Mishra, R. Boulder Prediction in Explosives Using an Artificial Neural Network. *ARNP J. Eng. dec. scientific* 2017, 12, 47–61. [Google Scholar]
15. Trivedi, R.; Singh, Tennessee; Gupta, N. Prediction of blast-induced volatile rocks in quarries using ANN and ANFIS. *Geotech. geol. English* 2015, 33, 875–891. [Google Scholar] [Cross Reference]
16. Leng, Z.; Sun, J.; Lu, W.; Xie, X.; Jia, Yu.; Zhou, G.; Chen, M. The mechanism of interaction of downhole detonation waves with double initiation with electronic detonators in bench blasting. *Comput. Geotech.* 2021, 129, 103873. [Google Scholar] [CrossRef]

© *A. A. Басаргин, 2023*