

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРИГГЕРНЫХ СОБЫТИЙ И АФТЕРШОКОВЫХ СЕРИЙ ПРИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ УДАРООПАСНОСТИ ГОРНОГО МАССИВА ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ «PROGNOZ-ADS»**

**А. П. Грунин\*, А. В. Сидляр**

*Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия*

*\*E-mail: lexx188@mail.ru*

---

В условиях ведения горных работ на удароопасных месторождениях важной задачей геофизического контроля является своевременное обнаружение процессов перераспределения напряжений в массиве горных пород. Такие процессы часто проявляются в виде триггерных событий, инициирующих последующие афтершоковые последовательности. Автоматизированная система контроля горного давления «Prognoz-ADS», применяемая на ряде удароопасных месторождений России, предназначена для непрерывной регистрации в массиве горных пород событий акустической эмиссии (являющихся следствием разрушения горных пород) в частотном диапазоне 0.2–12 кГц. Экспертный анализ данных системы, собранных за время ее эксплуатации, позволил выявить основные закономерности триггерно-афтершоковых серий, что дало возможность разработать алгоритм их автоматической идентификации.

Основа работы базируется на представлениях сейсмологии, согласно которым афтершоки возникают вследствие перераспределения напряжений после главного толчка (триггера), а их затухание во времени подчиняется закону Омори–Уцу. В рамках исследования были проанализированы современные подходы к описанию афтершоковых последовательностей, включая модели ETAS, LPL и PLE. На основе проведенного анализа был выбран метод идентификации триггер-афтершоковых серий, базирующийся на анализе энергетических и временных параметров реальных данных.

Для разработки методики и создания алгоритма автоматической идентификации были использованы 47, определенных экспертами, групп «триггер-афтершоки», зарегистрированных системой за период с 2011 по 2023 гг. В ходе статистического анализа этих групп определены ключевые параметры алгоритма. Для проверки его эффективности установлен минимальный порог энергии триггерного события, составляющий 5000 Дж. Минимальное число афтершоков в группе, позволяющее классифицировать событие как триггер, принято равным пяти. Анализ времени регистрации событий показал, что первое афтершоковое событие в 90% случаев происходит в течение 5 минут после триггера, а максимальный интервал между последующими событиями в группе не превышает 140 минут.

Алгоритм идентификации реализован на языке Python и протестирован на базе данных системы «Prognoz-ADS» Николаевского месторождения за период 2011–2024 гг. Качество работы алгоритма оценивалось по 47, выявленным экспертами, последовательностям. Из 47 триггерных серий алгоритм корректно идентифицировал 40, что соответствует 85% точности обнаружения. Случаи, когда алгоритм не обнаружил последовательности, представляют собой сложные сценарии, в которых предполагаемые триггеры попали в афтершоковые серии предшествовавших более мощных событий.

Одним из этапов верификации, позволяющим удостовериться, что найденная серия событий является именно триггерно-афтершоковой, а не интенсивным потоком фоновых событий, стала проверка выделенных длинных последовательностей (с числом афтершоков 10 и более) на соответствие закону затухания Омори–Уцу. Из 24 проанализированных групп с указанным количеством событий для 18 была получена сходимость модели с коэффициентами детерминации ( $R^2$ ) в диапазоне от 0.605 до 0.969. Это подтверждает, что выделенные алгоритмом группы в большинстве случаев отражают реальные физические процессы релаксации напряжений, а не случайную фоновую активность.

Разработанный алгоритм позволяет повысить оперативность и объективность анализа геодинамического состояния массива на Николаевском месторождении. Его применение дает возможность более детально оценивать акустическую активность и разрабатывать прогнозные критерии. Дальнейшие исследования будут направлены на повышение точности идентификации и интеграцию алгоритма в систему оперативного прогноза удароопасности.

**IDENTIFICATION OF TRIGGER EVENTS AND AFTERSHOCK SEQUENCES DURING SEISMOACOUSTIC MONITORING OF ROCK BURST HAZARD BASED ON DATA FROM THE «PROGNOZ-ADS» SYSTEM**

**A. P. Grunin\*, A. V. Sidlyar**

*Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia*

*\*E-mail: lexx188@mail.ru*

In the context of mining operations at rock burst-hazardous deposits, a key objective of geophysical monitoring is the timely detection of stress redistribution processes within the rock mass. Such processes often manifest as trigger events that initiate subsequent aftershock sequences. The automated rock pressure monitoring system «Prognoz-ADS», deployed at several rock burst-hazardous deposits in Russia, is designed for the continuous recording of acoustic emission events in the rock mass within the frequency range of 0.2–12 kHz. Expert analysis of the data collected by the system over its operational period has revealed the primary patterns of trigger-aftershock series, enabling the development of an algorithm for their automatic identification.

The work is grounded in the concepts of seismology, according to which aftershocks arise from the redistribution of stresses following a main shock, and their decay over time follows the Omori-Utsu law. The study analyzed modern approaches to describing aftershock sequences, including the ETAS, LPL, and PLE models. Based on this analysis, a method for identifying «trigger-aftershock» series was selected, relying on the analysis of energy and temporal parameters.

To develop and create the automatic identification algorithm, 47 expert-identified «trigger-aftershock» groups, recorded by the system between 2011 and 2023, were utilized. Statistical analysis of these groups determined the key parameters for the algorithm. To verify its effectiveness, a minimum energy threshold for the trigger event was set at 5000 J. The minimum number of aftershocks in a group required to classify an event as a trigger was established at five. Analysis of event registration times showed that in 90% of cases, the first aftershock event occurs within 5 minutes of the trigger, and the maximum interval between subsequent events within the group does not exceed 140 minutes.

The identification algorithm was implemented in Python and tested using the «Prognoz-ADS» database from the Nikolaevskoye deposit for the period 2011–2024. The algorithm's performance was evaluated against the 47 expert-identified sequences. Out of 47 trigger series, the algorithm correctly identified 40, corresponding to an 85% detection accuracy rate. Cases where the algorithm failed to detect sequences represent complex scenarios where the potential triggers fell within the aftershock series of preceding, more powerful events.

Verification involved checking long sequences ( $\geq 10$  aftershocks) for Omori-Utsu law compliance. Of the 24 analyzed groups meeting this event count criterion, 18 showed model convergence with coefficient of determination ( $R^2$ ) ranging from 0.605 to 0.969. This confirms that, in most cases, the groups identified by the algorithm reflect real physical processes of stress relaxation rather than random background activity.

The developed algorithm enhances the efficiency and objectivity of analyzing the geodynamic state of the rock mass at the Nikolaevskoye deposit. Its application enables a more detailed assessment of acoustic activity and the development of predictive criteria. Future research will focus on improving identification accuracy and integrating the algorithm into the operational rock burst hazard forecasting system.