

ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ МАССОВЫХ ВЗРЫВАХ В УСЛОВИЯХ УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ

Федченко Д.В.

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

Ключевые слова: техногенная сейсмичность, массовые взрывы, угольный карьер, магнитуда, параметры взрыва, сейсмический мониторинг, горный массив, геомеханические факторы.

Аннотация. Выполнен анализ параметров техногенной сейсмичности, зарегистрированной при проведении массовых взрывов на угольных разрезах. Исходная база включала более 100 событий типа «промышленный взрыв», для которых сопоставлялись магнитуда, энергетический класс, координаты и время регистрации, общее количество взрывчатого вещества на блоке, масса взрывчатого вещества в серии, проектное ограничение массы заряда и тип системы инициирования. Установлено, что линейная связь магнитуды с общим количеством взрывчатого вещества на блоке и массой взрывчатого вещества в серии имеет ограниченную тесноту: коэффициенты детерминации составили соответственно 0,16 и 0,18. Для подвыборки событий с известным расстоянием до пункта регистрации исследована зависимость магнитуды от приведенного параметра – отношения массы взрывчатых веществ в серии к квадрату расстояния до пункта регистрации. Полученная аппроксимация характеризуется низким коэффициентом детерминации 0,073 и не может рассматриваться как универсальная прогнозная зависимость. Показано, что масса заряда и геометрия наблюдений не исчерпывают факторов формирования техногенных сейсмических событий. На интерпретацию результатов существенное влияние могут оказывать структурная нарушенность, напряженно-деформированное состояние массива, условия распространения волн и фоновая сейсмичность. Результаты обосновывают необходимость непрерывного многофакторного мониторинга горного массива и расширения состава параметров, учитываемых при анализе сейсмической реакции на массовые взрывы.

PARAMETERS OF TECHNOGENIC SEISMICITY DURING PRODUCTION BLASTING IN OPEN-PIT COAL MINES

Fedchenko D.V.

Institute of mining Siberian branch of Russian academy of sciences, Novosibirsk

Keywords: technogenic seismicity, production blasting, open-pit coal mine, magnitude, blast parameters, seismic monitoring, rock mass, geomechanical factors.

Abstract. The paper presents an analysis of technogenic seismicity parameters recorded during production blasting in open-pit coal mines. The initial database included more than 100 industrial blast events for which magnitude, energy class, coordinates and recording time, total explosive mass per blast block, explosive mass per series, design limit of explosive mass, and initiation system type were compiled. The linear relationships between event magnitude and both total explosive mass and explosive mass per series were found to be weak: the coefficients of determination were 0.16 and 0.18, respectively. For the subset of events with a known source-to-station distance, the relationship between magnitude and the reduced parameter – ratio of the mass of explosives in the series to the square of the distance to the registration point was analyzed. The approximation has a low coefficient of determination 0.073, and therefore cannot be treated as a universal predictive relationship. The results show that explosive mass and observation geometry do not exhaust the factors controlling technogenic seismic events. Rock-mass structure, stress-strain state, wave propagation conditions, and background seismicity may substantially affect the recorded response. The obtained results substantiate the need for continuous multifactor monitoring of the rock mass and for expanding the set of parameters used to interpret the seismic response to production blasting.

1. Введение

Буровзрывная подготовка горной массы остается базовым технологическим процессом при открытой разработке месторождений твердых полезных ископаемых. Одновременно массовый взрыв является источником кратковременного динамического нагружения массива и сейсмовзрывных волн, распространяющихся за пределы проектного блока. Современные исследования рассматривают сейсмическое действие взрыва не только как фактор

безопасности охраняемых объектов, но и как источник информации о взаимодействии взрывной нагрузки с неоднородным горным массивом. В работах последних лет показана актуальность статистической классификации сейсмозрывных источников и адаптации параметров буровзрывных работ к изменяющимся горно-геологическим условиям [1, 2].

Для открытых горных работ особое значение имеет оценка реакции бортов карьеров, поверхностных зданий и сооружений, технологической инфраструктуры и иных объектов, расположенных в зоне влияния взрывов. Российские исследования демонстрируют, что одинаковые по формальным параметрам заряда взрывы могут формировать различающиеся уровни сейсмического воздействия вследствие направленности инициирования, строения массива, положения охраняемого объекта и условий распространения волн [3-6]. Поэтому инженерная интерпретация регистрируемых колебаний должна учитывать не только массу взрывчатого вещества (ВВ), но и совокупность геомеханических и пространственных факторов.

В международной практике прогнозирование сейсмического воздействия развивается в направлении статистических и интеллектуальных моделей. Ансамблевые алгоритмы машинного обучения, методы на основе релевантных векторов, гибридные нейросетевые модели и системы мониторинга, объединенные с промышленным интернетом вещей, позволяют повышать точность прогноза параметров колебаний на конкретных объектах [7-11]. Их общей особенностью является зависимость качества результата от полноты и репрезентативности исходных данных. При переносе модели между участками или при изменении горно-геологических условий требуется повторная настройка, поскольку реакция массива является объектно-зависимой.

Отдельная проблема состоит в различии между параметрами, характеризующими источник события, и параметрами колебаний в конкретном пункте наблюдения. Магнитуда применяется для интегральной энергетической характеристики сейсмического события, тогда как пиковая скорость смещения частиц массива и связанные с ней показатели характеризуют локальное воздействие в точке регистрации. Эти величины взаимосвязаны через свойства источника и среды распространения, однако не являются взаимозаменяемыми. Для техногенной сейсмичности горнопромышленных районов отмечена сложная связь между крупномасштабными взрывами, фоновыми процессами и регистрируемыми событиями [12]. Уже ранние работы по прогнозированию взрывных колебаний с применением нейросетей также показали, что использование только массы заряда и расстояния ограничивает устойчивость прогноза без учета свойств массива [13].

В связи с этим для задач геомеханического сопровождения открытых горных работ представляет интерес количественная оценка того, какую долю вариации зарегистрированной магнитуды могут объяснить непосредственно управляемые параметры массового взрыва. Если связь оказывается слабой, это означает необходимость перехода от локальной оценки отдельного взрыва к непрерывному накоплению данных, позволяющему анализировать состояние массива во времени и сопоставлять сейсмическую реакцию с дополнительными геомеханическими признаками.

Цель работы – оценить связь магнитуды техногенных сейсмических событий с параметрами массовых взрывов на угольных разрезах и обосновать состав информации, необходимой для дальнейшего многофакторного мониторинга состояния горного массива.

2. Материалы и методы исследований

2.1. Исходные данные и условия наблюдений

Исследования выполнены по данным сейсмических наблюдений в районе действующих угольных разрезов, разрабатываемых открытым способом. Условия характеризуются пространственной неоднородностью массива, различиями литологического состава и степени нарушенности пород, изменением глубины и конфигурации горных работ. Такие особенности создают переменную среду распространения сейсмических волн и затрудняют использование единой зависимости между параметрами взрыва и регистрируемым событием.

Массовые взрывы выполнялись скважинными зарядами промышленных взрывчатых веществ. В исходной базе наблюдений параметры взрывных работ изменялись в широком диапазоне: общее количество взрывчатого вещества на блоке достигало сотен тонн, тогда как масса взрывчатого вещества, приходящаяся на отдельную серию инициирования, была существенно меньше. Это различие принципиально, поскольку общий расход ВВ характеризует масштаб технологического блока, а масса ВВ в серии ближе связана с формированием единичного импульса при короткозамедленном взрывании.

Автором сформирована база данных сейсмических событий региона, включающая более 100 промышленных взрывов, а также местные и удаленные землетрясения, используемые при идентификации и разграничении источников. Для каждого промышленного взрыва в базе фиксировались тип события, местное время регистрации, координаты, энергетический класс K , магнитуда M , общее количество ВВ на блоке, масса ВВ в серии, максимально допустимая масса ВВ по проектной документации и тип применяемой системы инициирования. Наличие координатной и временной привязки обеспечивает возможность последующего объединения с данными маркшейдерской, геологической и геомеханической служб.

Структура исходной базы данных сгруппирована по назначению параметров (табл. 1).

Табл. 1. Состав параметров базы данных техногенных сейсмических событий

Группа данных	Параметры	Назначение при анализе
Идентификация события	Тип, дата и время, координаты	Разделение промышленных взрывов, местных и удаленных сейсмических событий; пространственно-временная привязка
Сейсмическая характеристика	Энергетический класс K , магнитуда M	Оценка энергетического уровня зарегистрированного события и сопоставление событий между собой
Параметры взрыва	Общее количество ВВ на блоке; масса ВВ в серии; максимальная проектная масса ВВ	Проверка связи с масштабом взрыва и параметрами инициирования
Технологический контекст	Тип системы инициирования	Группировка событий по применяемой технологии и последующий анализ влияния схемы инициирования

2.2. Показатели связи и статистическая обработка

На первом этапе оценивалась парная связь магнитуды M с тремя параметрами: общим количеством ВВ на блоке, массой ВВ в серии и максимально допустимой массой ВВ, принятой в проектной документации. Для первых двух зависимостей выполнялась простая линейная аппроксимация, а качество описания характеризовалось коэффициентом детерминации R^2 . Дополнительно рассчитывался коэффициент корреляции r . В данной работе R^2 используется не как подтверждение причинной связи, а как показатель доли вариации магнитуды, описываемой выбранной однофакторной линейной моделью.

На втором этапе для событий, по которым одновременно были доступны масса ВВ в серии и расстояние от источника до пункта регистрации, использован приведенный параметр Q/L^2 . Здесь Q – масса ВВ в серии, L – расстояние до пункта регистрации. Такой параметр позволяет в первом приближении совместно учитывать масштаб взрывного импульса и геометрическое удаление пункта наблюдения. Выбор показателя степени 2 не трактуется как универсальная физическая модель затухания, а используется, как диагностический способ проверить, повышает ли введение расстояния информативность зависимости магнитуды.

Для приведенного параметра выполнялось логарифмическое преобразование, после чего магнитуда аппроксимировалась линейной функцией логарифма Q/L^2 :

$$M = a \cdot \lg(Q/L^2) + b, \quad (1)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты линейной аппроксимации.

Все переменные приведены при первом использовании, а расчеты выполнялись в согласованной системе единиц.

Выбранный подход позволяет сопоставить характер зависимости с широко применяемыми масштабированными параметрами, используемыми в инженерном прогнозе сейсмовзрывного воздействия [1, 3-6]. Однако магнитуа и скорость смещения частиц являются различными характеристиками, поэтому зависимость для M не следует напрямую переносить на прогноз PPV.

2.3. Ограничения принятой методики

При интерпретации результатов учитывались ограничения исходной базы. Во-первых, выборка формировалась по производственным наблюдениям, а не по специально спланированному факторному эксперименту. Поэтому вместе с массой ВВ изменялись положение блоков, геометрия сети скважин, условия залегания пород, расстояние и азимут до пункта регистрации, фоновые технологические процессы и другие параметры. Во-вторых, магнитуа характеризует событие интегрально и не является прямым критерием сейсмической безопасности конкретного охраняемого объекта. В-третьих, подвыборка с приведенным параметром Q/L^2 меньше общей базы, поскольку для ее формирования необходим полный набор координатной и технологической информации.

Указанные ограничения не снижают ценность анализа как диагностического этапа. Напротив, они позволяют проверить, достаточно ли традиционных управляемых параметров взрыва для описания фактической сейсмической реакции. При низкой информативности однофакторных зависимостей дальнейшее повышение качества интерпретации должно достигаться расширением состава признаков, а не усложнением математической формы зависимости при том же наборе исходных данных.

3. Результаты исследований

3.1. Связь магнитуды с массой взрывчатого вещества

Распределение наблюдений показывает положительный общий тренд между магнитудой и количеством ВВ на блоке, однако разброс значений велик (рис. 1). Для близких значений массы ВВ зарегистрированы события с различающимися магнитудами, а увеличение общего количества ВВ не сопровождается пропорциональным ростом M . Коэффициент корреляции составил $r = 0,40$, коэффициент детерминации линейной модели – $R^2 = 0,16$.

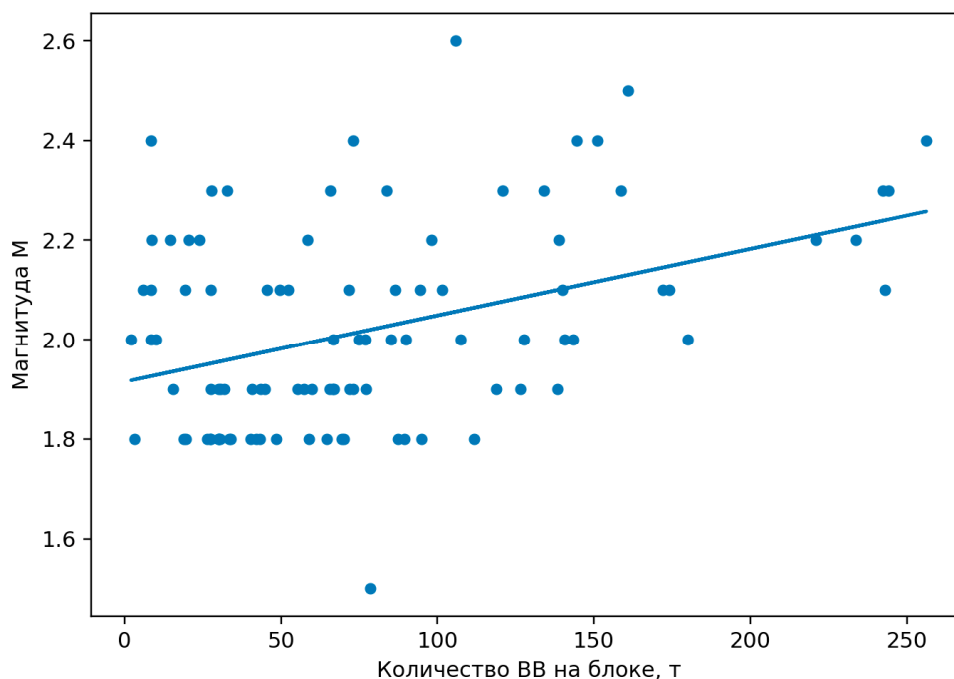


Рис. 1. Зависимость магнитуды от общего количества ВВ на блоке ($R^2 = 0,16$)

Таким образом, линейная модель, содержащая только общее количество ВВ на блоке, описывает около 16% вариации магнитуды в рассматриваемой базе. Остальная часть вариации связана либо с нелинейностью зависимости, либо с влиянием неучтенных факторов. С технологической точки зрения такой результат закономерен: общий расход ВВ характеризует суммарный масштаб взрыва, но не отражает распределение энергии во времени, последовательность инициирования и условия прохождения волн через массив.

Для массы ВВ в серии тенденция несколько выраженнее, но также остается слабой (рис. 2). Коэффициент корреляции $r = 0,42$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,18$. Следовательно, выбранная однофакторная линейная модель объясняет около 18% вариации магнитуды. Небольшое увеличение R^2 по сравнению с общим количеством ВВ согласуется с представлением о том, что масса в серии ближе связана с интенсивностью формируемого импульса, однако ее самостоятельной информативности недостаточно для надежного прогноза события.

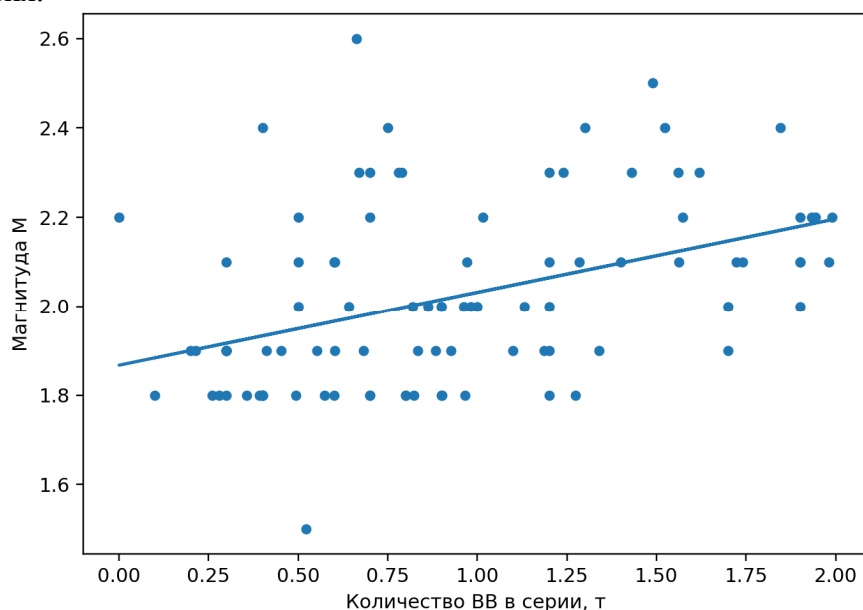


Рис. 2. Зависимость магнитуды от массы ВВ в серии ($R^2 = 0,18$)

Связь магнитуды с максимально допустимой массой ВВ по проекту оказалась еще слабее: коэффициент корреляции $r = 0,30$. Проектное ограничение отражает расчетный режим безопасного ведения работ, но не содержит информации о фактической реализации каждого конкретного блока, поэтому его использование в качестве единственного предиктора зарегистрированной магнитуды методически ограничено.

Сводные значения показателей связи приведены в таблице 2.

Табл. 2. Оценка связи магнитуды с параметрами массовых взрывов

Параметр	Коэффициент корреляции r	Коэффициент детерминации R^2
Магнитуда M – общее количество ВВ на блоке, т	0,40	0,16
Магнитуда M – масса ВВ в серии, т	0,42	0,18
Магнитуда M – максимальная масса ВВ по проекту, т	0,30	–

Примечание. Значения рассчитаны по строкам базы, относящимся к событиям типа «промышленный взрыв»; R^2 приведен для простой линейной аппроксимации.

3.2. Учет расстояния до пункта регистрации

Введение расстояния в виде приведенного параметра Q/L^2 не привело к повышению тесноты связи с магнитудой. Для соответствующей подвыборки экспериментальных данных в логарифмических координатах получена зависимость:

$$M = -0,132 \cdot \lg(Q/L^2) + 1,658; R^2 = 0,073. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,073$ показывает, что линейная модель в выбранных координатах описывает менее одной десятой наблюдаемой вариации магнитуды. Отрицательный коэффициент при логарифме приведенного параметра не следует интерпретировать как универсальную физическую закономерность: он получен для ограниченной производственной подвыборки и отражает совокупное влияние неоднородности условий взрывания и среды распространения. Графическое представление зависимости приведено на рисунке 3.

Полученный результат принципиален для дальнейшего построения системы мониторинга. Даже после включения расстояния к пункту регистрации простая однофакторная зависимость остается слабой. Следовательно, недостаточная корреляция не может быть устранена только заменой абсолютной массы заряда на один приведенный показатель; требуется описание состояния массива и технологического контекста каждого события.

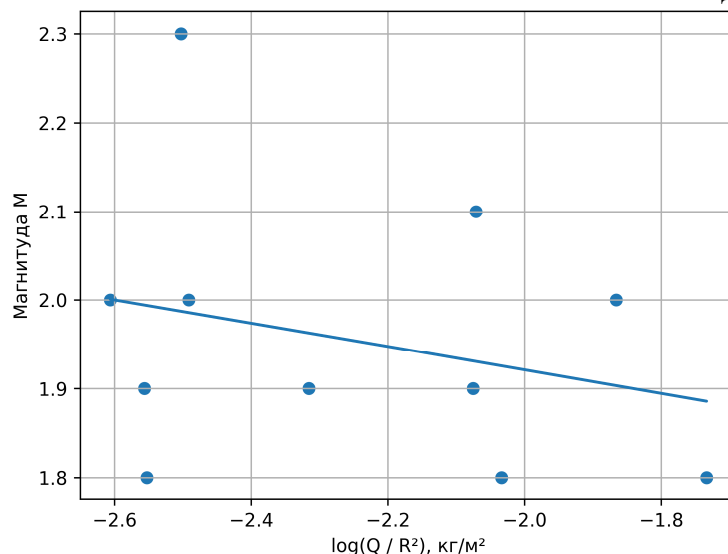


Рис. 3. Зависимость магнитуды техногенных событий от приведенного параметра Q/L^2

3.3. Требования к расширению мониторинговой базы

Сопоставление полученных коэффициентов связи позволяет сформулировать требования к дальнейшему накоплению данных. В первую группу должны входить фактические параметры источника: масса ВВ на блоке и на ступень замедления, количество скважин, интервалы замедлений, схема и направление инициирования, геометрия заряда. Во вторую – пространственные характеристики: координаты блока и пунктов наблюдения, расстояние, превышение отметок и азимут распространения. В третью – параметры массива: литологический состав, трещиноватость, структурные нарушения, обводненность и доступные оценки напряженно-деформированного состояния. Четвертая группа должна описывать зарегистрированный сигнал: магнитуду, энергетический класс, пиковую скорость смещения частиц, частотные параметры и длительность импульса.

Такой состав данных соответствует современному подходу к адаптации буровзрывных работ, при котором параметры взрыва корректируются по мере накопления сведений о свойствах массива и фактической реакции на воздействие [2]. Для сейсмической безопасности охраняемых объектов важно дополнительно использовать локальные критерии, основанные на параметрах колебаний в точке наблюдения [1, 3-6]. Поэтому магнитуда в создаваемой базе должна рассматриваться как один из признаков события, а не как единственный показатель интенсивности воздействия.

Современные алгоритмы машинного обучения способны учитывать нелинейное взаимодействие множества признаков и показывают высокую эффективность на объектно-ориентированных наборах данных [7-11]. Однако применение таких методов целесообразно только после формирования устойчивой, корректно размеченной базы наблюдений. Представленные результаты показывают, что на текущем этапе приоритетным является повышение информативности исходных данных, а не усложнение регрессионной модели.

4. Обсуждение результатов

Результаты исследования показывают, что непосредственная связь зарегистрированной магнитуды с управляемыми параметрами массового взрыва выражена слабо. Максимальное значение R^2 среди рассмотренных однофакторных линейных моделей составило 0,18 для массы ВВ в серии. Этот результат не означает отсутствия влияния массы заряда на сейсмическое событие. Он показывает, что в реальных условиях угольных разрезов влияние массы проявляется совместно с геометрией взрыва, временной структурой инициирования и свойствами массива, поэтому выделить его на неоднородной производственной выборке одной линейной зависимостью затруднительно.

Современные работы по сейсмозрывному воздействию подтверждают объектно-зависимый характер параметров затухания и необходимость учитывать особенности конкретного массива [1-6]. В частности, классификация по формулам типа USBM опирается на коэффициент сейсмичности и показатель затухания, значения которых определяются по экспериментальным данным объекта [1]. Методики адаптации параметров БВР также исходят из изменчивости структурных и физико-механических характеристик массива [2]. Полученные в настоящей работе низкие коэффициенты детерминации согласуются с этой логикой: стабильный прогноз нельзя строить исключительно по массе ВВ без идентификации условий среды.

Отдельного внимания требует различие между магнитудой техногенного события и параметрами сейсмозрывного воздействия на охраняемый объект. Магнитуда характеризует энергетический масштаб источника и удобна для единой каталогизации событий. Пиковая скорость смещения частиц и спектральные характеристики зависят от конкретной точки наблюдения и непосредственно используются при инженерной оценке воздействия. Поэтому перспективная система мониторинга должна обеспечивать совместное хранение обеих групп параметров. Такой двухуровневый подход позволит анализировать как особенности источника, так и фактическое воздействие на заданный элемент горнотехнической системы.

Уменьшение R^2 при переходе к Q/L^2 также важно методически. Само включение расстояния не гарантирует улучшения модели, если используемый показатель не учитывает направление распространения, неоднородность пород и фактическую временную структуру взрыва. В работах по численному моделированию откосов показано, что форма рельефа и высотные условия существенно изменяют вибрационный отклик [10]. Российские исследования охраняемых объектов также отмечают влияние расположения блока и условий распространения сейсмозрывных волн [3-6]. Следовательно, следующий этап исследований должен включать пространственную привязку каждого события к геологической и горнотехнической модели.

Ограничением настоящей работы является производственный характер исходной выборки и отсутствие в ней на данном этапе полного набора геомеханических признаков. Не проводилась оценка статистической значимости многомерных моделей, поскольку это потребовало бы предварительного устранения пропусков, унификации параметров разных периодов наблюдений и формирования независимой проверочной выборки. Данные ограничения определяют направление развития исследования: непрерывная автоматизированная регистрация, нормализация метаданных взрыва и интеграция результатов с информацией о состоянии массива.

5. Выводы

1. По базе, включающей более 100 промышленных взрывов, установлена ограниченная линейная связь магнитуды техногенных событий с общим количеством ВВ на блоке и массой ВВ в серии: коэффициенты детерминации составили 0,16 и 0,18 соответственно.

2. Использование приведенного параметра Q/L^2 для подвыборки событий с известным расстоянием до пункта регистрации не повысило качество однофакторного описания. Получена зависимость $M = -0,132 \cdot \lg(Q/L^2) + 1,658$ при $R^2 = 0,073$, которая характеризует только рассматриваемую выборку и не может использоваться как универсальная прогнозная модель.

3. Масса ВВ и расстояние до пункта регистрации являются необходимыми, но недостаточными признаками для интерпретации техногенной сейсмичности. Дополнительно должны учитываться схема инициирования, пространственное положение блока, структурно-тектонические особенности, трещиноватость, условия распространения волн и текущее состояние массива.

4. Магнитуду целесообразно использовать для каталогизации и сопоставления энергетического уровня техногенных событий совместно с локальными параметрами сейсмических колебаний в пунктах наблюдения, прежде всего с пиковой скоростью смещения частиц и частотными характеристиками.

5. Полученные результаты обосновывают переход к непрерывному многофакторному мониторингу и формированию единой базы данных, пригодной для последующего построения объектно-ориентированных статистических и интеллектуальных моделей.

6. Заключение

Проведенный анализ показывает, что техногенная сейсмичность при массовых взрывах на угольных разрезах не может быть надежно описана только параметрами заряда. Количественно это проявляется в низких значениях R^2 для зависимостей магнитуды от общего количества ВВ, массы ВВ в серии и приведенного параметра, включающего расстояние. Наиболее важным результатом является не получение частной регрессионной формулы, а выявление недостаточности однофакторной модели для производственных условий.

Дальнейшее развитие работы связано с созданием программно-аппаратного комплекса непрерывного мониторинга состояния горного массива, накоплением синхронизированных сейсмических и технологических данных и последующим переходом к многофакторному анализу. Такой подход позволит отделять влияние параметров конкретного взрыва от изменений геомеханического состояния массива и использовать результаты мониторинга при корректировке буровзрывных работ.

7. Благодарности и финансирование

Автор выражает благодарность коллегам и специалистам, участвовавшим в обсуждении результатов сейсмического мониторинга и постановке задач дальнейшего исследования.

Специальное внешнее финансирование для подготовки настоящей статьи не заявлено.

Список литературы

1. Господариков А.П., Зацепин М.А., Ковалевский В.Н., Холодилов А.Н. Принципы классификации сейсмозрывных источников согласно формуле USBM // Записки Горного института. – 2026. – Т. 279. – С. 82-89.
2. Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А. Методологические основы адаптации параметров буровзрывных работ к изменяющимся горно-геологическим условиям при разработке сложноструктурных месторождений // Горная промышленность. – 2024. – № 6. – С. 89-97. – doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-89-97.
3. Дарбиян Т.П., Уваров И.И., Федосеев А.В., Трофимов А.В. Оценка сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные охранные объекты карьера рудника «Заполярный» ООО «Медвежий ручей» // Горный журнал. – 2023. – №1. – С. 102-106. – doi.org/10.17580/gzh.2023.01.17.
4. Шапошник Ю.Н., Конурин А.И., Неверов А.А., Неверов С.А. Оценка сейсмического действия массовых взрывов в карьере на поверхностные здания и сооружения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 97-104. – doi.org/10.15372/FPVGN2024110213.
5. Новиньков А.Г., Самусев П.А., Протасов С.И. Обеспечение сейсмической безопасности строительных объектов при массовых промышленных взрывах с учетом предельных состояний первой группы // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – №2. – С. 48-57. – doi.org/10.24000/0409-2961-2024-2-48-57.
6. Соколов С.Т., Хохлов С.В., Баженова А.В. Оценка влияния взрыва протяженного блока на охраняемый объект // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №9-1. – С. 122-134. – doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_122.
7. Hosseini S., Pourmirzaee R., Armaghani D.J., Sabri Sabri M.M. Prediction of ground vibration due to mine blasting in a surface lead-zinc mine using machine learning ensemble techniques // Scientific Reports. 2023, vol. 13, p. 6591. doi.org/10.1038/s41598-023-33796-7.
8. Fissha Y., Khatti J., Ikeda H., Grover K.S., Owada N., Toriya H., Adachi T., Kawamura Y. Predicting ground vibration during rock blasting using relevance vector machine improved with dual kernels and metaheuristic algorithms // Scientific Reports. 2024, vol. 14, p. 20026. doi.org/10.1038/s41598-024-70939-w.

9. Aruna M., Vardhan H., Tripathi A.K., Parida S., Raja Sekhar Reddy N.V., Sivalingam K.M., Yingqiu L., Elumalai P.V. Enhancing safety in surface mine blasting operations with IoT based ground vibration monitoring and prediction system integrated with machine learning // Scientific Reports. 2025, vol. 15, p. 3999. doi.org/10.1038/s41598-025-86827-w.
10. Wu X., Zhu D., Lu H., Li L. Simulation research on blasting of an open pit mine slope considering elevation conditions and slope shape factors // Frontiers in Earth Science. 2024, vol. 12, p. 1417895. doi.org/10.3389/feart.2024.1417895.
11. Zhao S., Wang L., Cao M. Chaos Game Optimization-hybridized artificial neural network for predicting blast-induced ground vibration // Applied Sciences. 2024, vol. 14, no. 9, p. 3759. doi.org/10.3390/app14093759.
12. Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А., Хазинс В.М. Геоэкологические последствия проведения горных работ на карьерах с применением взрывных технологий // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – №2. – С. 164-178. – doi.org/10.15372/FTPRPI20200219.
13. Khandelwal M., Singh T.N. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2009, vol. 46, no. 7, pp. 1214-1222. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.03.004.

References

1. Gospodarikov A.P., Zatsepin M.A., Kovalevsky V.N., Kholodilov A.N. Principles of classification of seismic-blast sources according to the USBM formula // Journal of Mining Institute. 2026, vol. 279, pp. 82-89.
2. Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A. Methodological basis for adaptation of the drilling and blasting parameters to changing mining and geological conditions when mining complex-structured deposits // Russian Mining Industry. 2024, no. 6, pp. 89-97. doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-89-97.
3. Darbinyan T.P., Uvarov I.I., Fedoseev A.V., Trofimov A.V. Assessment of seismic impact of blasting operations on surface protected objects of the Zapolyarny mine open pit // Gornyi Zhurnal. 2023, no. 1, pp. 102-106. doi.org/10.17580/gzh.2023.01.17.
4. Shaposhnik Yu.N., Konurin A.I., Neverov A.A., Neverov S.A. Assessment of seismic effect of production blasting in an open pit on surface buildings and structures // Fundamental and Applied Mining Science. 2024, vol. 11, no. 2, pp. 97-104. doi.org/10.15372/FPVGN2024110213.
5. Novinkov A.G., Samusev P.A., Protasov S.I. Ensuring seismic safety of construction objects during production blasting with allowance for the first-group limit states // Occupational Safety in Industry. 2024, no. 2, pp. 48-57. doi.org/10.24000/0409-2961-2024-2-48-57.
6. Sokolov S.T., Khokhlov S.V., Bazhenova A.V. Assessment of the effect of an extended blast block on a protected object // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023, no. 9-1, pp. 122-134. doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_122.
7. Hosseini S., Pourmirzaee R., Armaghani D.J., Sabri Sabri M.M. Prediction of ground vibration due to mine blasting in a surface lead-zinc mine using machine learning ensemble techniques // Scientific Reports. 2023, vol. 13, p. 6591. doi.org/10.1038/s41598-023-33796-7.
8. Fissaha Y., Khatti J., Ikeda H., Grover K.S., Owada N., Toriya H., Adachi T., Kawamura Y. Predicting ground vibration during rock blasting using relevance vector machine improved with dual kernels and metaheuristic algorithms // Scientific Reports. 2024, vol. 14, p. 20026. doi.org/10.1038/s41598-024-70939-w.
9. Aruna M., Vardhan H., Tripathi A.K., Parida S., Raja Sekhar Reddy N.V., Sivalingam K.M., Yingqiu L., Elumalai P.V. Enhancing safety in surface mine blasting operations with IoT based ground vibration monitoring and prediction system integrated with machine learning // Scientific Reports. 2025, vol. 15, p. 3999. doi.org/10.1038/s41598-025-86827-w.
10. Wu X., Zhu D., Lu H., Li L. Simulation research on blasting of an open pit mine slope considering elevation conditions and slope shape factors // Frontiers in Earth Science. 2024, vol. 12, p. 1417895. doi.org/10.3389/feart.2024.1417895.
11. Zhao S., Wang L., Cao M. Chaos Game Optimization-hybridized artificial neural network for predicting blast-induced ground vibration // Applied Sciences. 2024, vol. 14, no. 9, p. 3759. doi.org/10.3390/app14093759.
12. Adushkin V.V., Soloviev S.P., Spivak A.A., Khazins V.M. Open pit mining with blasting: geoecological aftermath // Journal of Mining Science. 2020, vol. 56, no. 2, pp. 309-321. DOI: 10.1134/S1062739120026794.
13. Khandelwal M., Singh T.N. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2009, vol. 46, no. 7, pp. 1214-1222. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.03.004.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Федченко Дмитрий Владимирович – соискатель	Fedchenko Dmitry Vladimirovich – degree applicant
fedfromsib@gmail.com	

Получена 11.08.2026