

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.235:550.348:004.4

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-177-189

## АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ПРИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ

Федченко Дмитрий Владимирович\*,  
Еременко Андрей Андреевич

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН

\* для корреспонденции: fedfromsib@gmail.com



### Информация о статье

Поступила:

15 августа 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:

15 сентября 2026 г.

### Ключевые слова:

буровзрывные работы,  
техногенная сейсмичность,  
состояние горного массива,  
сейсмический мониторинг,  
пиковая скорость смещения  
частиц; обработка сигналов,  
программно-аппаратный  
комплекс, архитектура  
программного обеспечения

### Аннотация.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от разовых измерений и постфактум-анализа параметров сейсмических колебаний к системному цифровому мониторингу реакции горного массива на буровзрывное воздействие. Существующие исследования преимущественно посвящены прогнозированию пиковой скорости смещения частиц, автоматическому обнаружению событий либо созданию отдельных средств регистрации, тогда как вопросы согласованного взаимодействия программных компонентов мониторинга разработаны недостаточно. Работа посвящена обоснованию архитектуры программного обеспечения программно-аппаратного комплекса мониторинга состояния горного массива при буровзрывных работах (ПАК МСГП). Методика основана на системном анализе, структурно-функциональном моделировании и декомпозиции процессов получения, обработки, хранения и представления сейсмических данных. Предложена модульная архитектура, включающая подсистемы регистрации и синхронизации сигналов распределенной сети трехкомпонентных датчиков, предварительной цифровой обработки, автоматического детектирования событий, расчета параметров колебаний, централизованного хранения и пользовательского доступа. Сформирован алгоритмический контур, предусматривающий проверку качества входных данных, полосовую фильтрацию временных рядов, обнаружение событий методом STA/LTA и определение пиковой скорости смещения частиц массива, доминирующей частоты и длительности импульса. Обосновано разделение аналитического ядра, серверного уровня и мобильного клиентского программного обеспечения на базе Android. Результатом исследования является структурно-функциональная модель программного обеспечения ПАК МСГП, создающая основу для накопления сопоставимых данных о техногенных сейсмических событиях, повторной обработки исходных записей и последующей экспериментальной проверки методов цифровой интерпретации состояния горного массива. Показано, что предложенное разделение функций исключает дублирование вычислительных операций на мобильном устройстве, обеспечивает масштабирование комплекса и допускает подключение дополнительных алгоритмов анализа без изменения базовой логики сбора данных.

**Для цитирования:** Федченко Д.В., Еременко А.А. Архитектура программного обеспечения комплекса мониторинга состояния горного массива при буровзрывных работах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 177-189. DOI: 10.26730/1999-

4125-2026-4-177-189, EDN: DFIGLI

**Благодарности**

Авторы выражают благодарность коллегам и специалистам, принимавшим участие в обсуждении результатов исследования, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению рукописи.

**1. Введение**

При открытой разработке месторождений глубина карьеров и объемы массовых взрывов постепенно увеличиваются. Одновременно сокращаются расстояния от взрывных блоков до бортов, сооружений и производственной инфраструктуры. В этих условиях при каждом массовом взрыве важно фиксировать не только факт сейсмического воздействия, но и параметры зарегистрированных колебаний. Их величина и частотный состав зависят от параметров зарядов, расстояния до пункта наблюдения, свойств пород и условий распространения волн [1, 2]. Накопление таких записей дает возможность сравнивать реакцию массива на последовательные взрывы.

Для инженерной оценки сейсмического воздействия чаще всего используют пиковую скорость смещения частиц массива (Peak Particle Velocity, PPV). Классические зависимости связывают PPV с массой заряда, расстоянием до пункта регистрации и эмпирическими коэффициентами для конкретных горно-геологических условий. Такие модели удобны в производственных расчетах, но их применение за пределами исходной выборки ограничено. На результат влияют неоднородность массива, схема взрывания, направление распространения волн и условия установки датчиков [1, 2, 7].

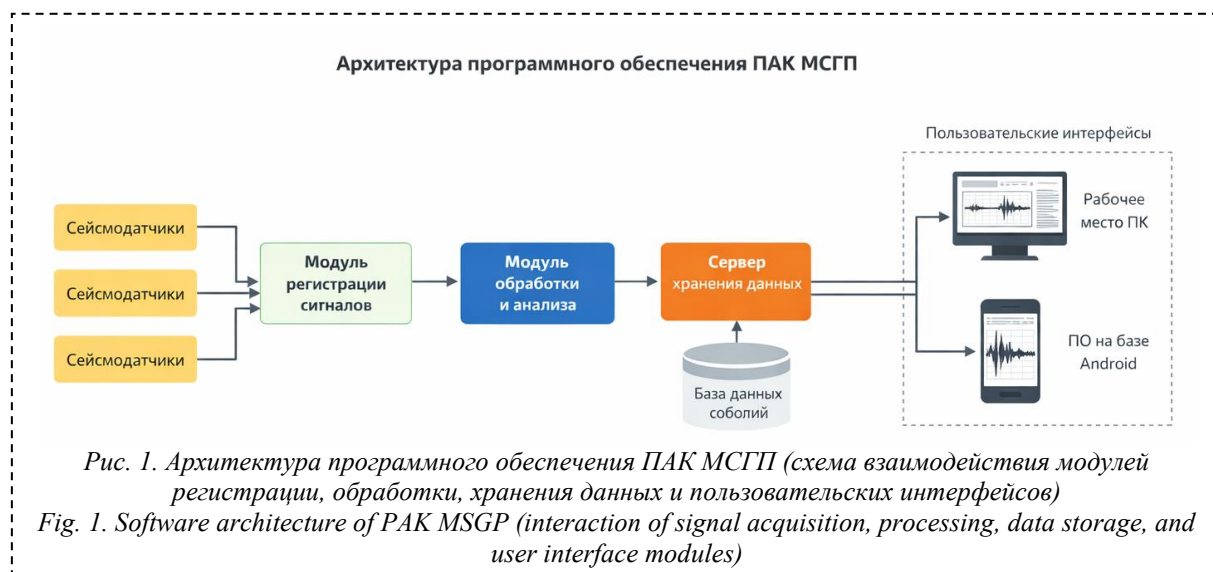
Поэтому наряду с эмпирическими зависимостями применяются регрессионные модели [3, 5, 7], искусственные нейронные сети [4, 6, 8], нейро-нечеткие методы [9, 10, 11] и ансамблевые алгоритмы [12, 13]. Они позволяют учитывать нелинейные связи между

параметрами взрыва, расстоянием, характеристиками массива и значением PPV. При этом качество прогноза напрямую зависит от того, насколько представительной является исходная выборка и одинаково ли были обработаны входящие в нее записи. Перед обучением или сравнением моделей необходима база сейсмических событий, в которой исходные данные и рассчитанные параметры хранятся в едином формате.

Современные цифровые средства регистрации позволяют использовать несколько пунктов наблюдения и передавать записи в единый центр обработки [14]. Но сама по себе сеть датчиков задачу мониторинга не решает. Записи с разных станций необходимо синхронизировать, связать с координатами пунктов наблюдения и параметрами конкретного массового взрыва, после чего сохранить исходные и расчетные данные в общей структуре.

Отдельная задача связана с автоматическим обнаружением события в непрерывной записи. Для этой цели применяются пороговые и статистические алгоритмы, в том числе STA/LTA [15–17]. В более новых исследованиях для детектирования и определения сейсмических фаз используются сверточные и рекуррентные нейронные сети [18–20]. На горных предприятиях обработка усложняется постоянным фоном от транспорта, дробильного и другого технологического оборудования, поэтому параметры алгоритма требуется настраивать по данным конкретного объекта.

Российские работы также показывают



переход от отдельных измерений к автоматизированным системам наблюдения. На Восточном руднике КФ АО «Апатит» действует сеть, объединяющая средства регистрации, детектирования и накопления сейсмических данных [21]. На Эльгинском месторождении программно-аппаратный комплекс применялся для регистрации, цифровой обработки и интерпретации сейсмического действия технологических взрывов [22]. При этом оценка воздействия не должна ограничиваться только PPV: при интерпретации учитываются частотные характеристики и условия конкретного объекта [23]. Эти примеры подтверждают практическую потребность в объединении измерительных и программных средств, но не определяют универсальную структуру программного комплекса.

Для последующего анализа важно сохранять не только рассчитанные параметры события, но и исходную сейсмограмму. При изменении полосы фильтрации, порога детектирования или способа расчета PPV одна и та же запись должна обрабатываться повторно. Если исходные и расчетные данные находятся в разных системах или не имеют общей идентификации, корректное сравнение результатов становится затруднительным.

Еще одно требование относится к распределению вычислений. Аналитические операции целесообразно выполнять централизованно, а пользовательским приложениям передавать уже подготовленный результат. В противном случае одинаковые алгоритмы приходится поддерживать на разных устройствах, что увеличивает число версий программного обеспечения и усложняет контроль получаемых расчетов.

Из рассмотренных работ следует, что методы прогноза PPV, автоматического детектирования и распределенной регистрации развиваются достаточно активно. Вместе с тем для исследовательского мониторинга требуется связать эти операции в одном программном контуре: от приема исходного сигнала до сохранения параметров события и их отображения пользователю. Именно эта задача рассматривается в настоящей работе.

Цель работы состоит в разработке и обосновании архитектуры программного обеспечения ПАК МСПП, в которой процессы регистрации, проверки качества, обработки, хранения и представления данных о техногенных сейсмических событиях выполняются как последовательные части одной системы.

## 2. Методы

### 2.1 Архитектура программного обеспечения программно-аппаратного комплекса мониторинга состояния горного массива

При разработке структуры ПАК МСПП сначала были определены данные, поступающие от трехкомпонентных сейсмических датчиков, и результаты, которые должны получать пользовательские приложения. Затем программный комплекс был разделен на регистрационный, аналитический, серверный и пользовательский уровни. Для каждого уровня определены входные данные, выполняемые операции и выходная информация.

Работа выполнялась последовательно. Сначала установлен состав информации для каждого программного уровня. Затем выделены функциональные модули и связи между ними. После этого сформирована последовательность прохождения сейсмического сигнала от регистрации до расчета параметров события, сохранения результата и передачи данных пользователю.

Рассматриваемая программная система начинается с момента формирования цифрового отсчета датчиком и заканчивается выдачей пользователю проверенных параметров события. Распространение волн в массиве, конструкция самого измерительного преобразователя и инженерные решения по результатам мониторинга в границы модели не включались. Такое ограничение позволяет сосредоточиться именно на организации программного взаимодействия.

При построении архитектуры исходили из четырех требований. Каждый модуль должен иметь определенный набор входных и выходных данных. Исходная сейсмограмма и рассчитанные по ней параметры связываются одним идентификатором события. Настройки обработки и версия алгоритма сохраняются вместе с результатом. Пользовательское приложение получает рассчитанные параметры через единый программный интерфейс и не выполняет аналитические расчеты самостоятельно.

В системе выделены исходные и производные данные. К исходным относятся идентификатор датчика, координаты пункта наблюдения, время начала записи, частота дискретизации, калибровочные коэффициенты, трехкомпонентный временной ряд и признаки качества связи. К производным относятся идентификатор события, границы выделенного импульса, PPV по компонентам и результирующее значение, доминирующая частота, длительность, энергетический показатель, настройки алгоритма и связь с параметрами массового взрыва.

Такое разделение нужно для повторной обработки архива. Если изменяются параметры фильтра, порог STA/LTA или способ расчета частотных характеристик, исходная запись остается неизменной и может быть рассчитана

заново. Вместе с новым результатом сохраняются версия алгоритма и дата обработки. За счет этого можно сравнить несколько вариантов расчета одного и того же события.

При непрерывной регистрации возможны временные разрывы связи, поэтому на стороне регистратора предусматривается буферизация данных. Принятые пакеты подтверждаются, а пропуски фиксируются. Если связь нарушена, запись временно хранится локально и передается после восстановления канала. Сигнал с нарушенной синхронизацией, пропусками отсчетов или некорректной калибровкой не удаляется, а получает соответствующий признак качества.

Архитектуру оценивали по следующим признакам: возможность добавить новый пункт наблюдения без изменения логики обработки; сохранение исходных временных рядов; возможность определить, каким датчиком и с какими настройками был получен конкретный результат; централизованное управление конфигурацией; разграничение прав доступа; повторная обработка архива; одинаковое представление результатов на стационарном и мобильном клиенте.

По итогам такого разбиения сформирована модульная структура ПАК МСГП. Регистрация, анализ, хранение и отображение данных выполняются разными компонентами. Это уменьшает число прямых зависимостей между ними и позволяет изменять отдельный модуль без перестройки всего программного комплекса.

Структура программного обеспечения ПАК МСГП включает следующие основные модули:

1. Модуль регистрации сигналов – прием и синхронизация данных от сети сейсмических датчиков.
2. Модуль обработки и анализа данных – фильтрация сигналов, детектирование событий и расчет параметров сейсмических колебаний.
3. Сервер хранения данных – централизованное хранение информации о зарегистрированных событиях.
4. Пользовательские интерфейсы – стационарные рабочие станции и программное обеспечение на базе Android.

При таком разделении увеличение числа датчиков не требует изменения структуры аналитического и пользовательского уровней. Дополнительный алгоритм обработки также может быть подключен отдельно, если для него определены входные данные и формат сохраняемого результата.

Регистрационный модуль проверяет целостность поступившего пакета, выполняет временную привязку и учитывает калибровочные коэффициенты каналов. Нормализованный временной ряд передается в модуль обработки. Сервер хранит исходные

записи, рассчитанные параметры событий, сведения о датчиках и настройки алгоритмов. Пользовательские приложения получают данные через контролируемый программный интерфейс.

Отказ пользовательского клиента не должен останавливать регистрацию или обработку данных. По той же причине обновление мобильного приложения не должно требовать изменения архива. Для подключения нового алгоритма достаточно определить его входные данные, набор выходных параметров и правило сохранения версии результата.

Обобщенная структура взаимодействия модулей программного обеспечения программно-аппаратного комплекса мониторинга состояния горного массива представлена на Рис. 1.

## 2.2 Алгоритмы обработки сейсмических сигналов в ПАК МСГП

Алгоритмический контур ПАК МСГП предназначен для выделения техногенных сейсмических событий на фоне производственных и природных помех. После обнаружения события из записи рассчитываются параметры, необходимые для дальнейшего инженерного и исследовательского анализа.

Основным показателем интенсивности в рассматриваемой модели принят PPV, который широко используется при оценке действия массовых взрывов на сооружения и элементы горного массива [1–3]. Вместе с PPV для каждого события сохраняются доминирующая частота, длительность импульса, время регистрации и координаты пункта наблюдения.

Обработка строится как последовательность нескольких операций: проверка входной записи, предварительная обработка сигнала, детектирование события, расчет его параметров и сохранение результата в базе данных.

Для каждой операции сохраняются настройки и полученный результат. Это нужно для того, чтобы при повторном расчете можно было отличить изменение алгоритма от изменения самой исходной записи. До детектирования проверяются временная метка, частота дискретизации, длина массива, наличие пропусков и идентификатор датчика.

После этой проверки цифровые отсчеты переводятся в физические единицы скорости с учетом калибровочного коэффициента каждого канала. Для трехкомпонентной станции преобразование выполняется отдельно по каждой оси. Из записи также удаляются постоянная составляющая и линейный тренд, так как они искажают низкочастотную часть спектра и могут влиять на работу порогового алгоритма.

Параметры фильтра не задаются жестко в программном коде. Нижняя и верхняя частоты, порядок фильтра и способ его применения записываются в конфигурации обработки. Это

необходимо потому, что спектр полезного сигнала и производственных помех будет различаться для разных объектов и мест установки датчиков. При офлайн-обработке может использоваться двунаправленная фильтрация, а в потоковом режиме учитывается задержка причинного фильтра.

Предварительная обработка нужна для ограничения влияния внеполосных составляющих и подготовки записи к детектированию. Рабочая полоса должна назначаться по фактическому частотному составу сигналов и помех на выбранном предприятии, поэтому фиксированное универсальное значение для нее в архитектуре не задается.

Для автоматического выделения события используется отношение STA/LTA [15–17]. Короткое окно характеризует текущее изменение уровня сигнала, длинное окно используется для оценки фоновый уровень. Событие считается начавшимся после превышения установленного порога. Значения окон и порогов предполагается определять по размеченным записям конкретного объекта.

Для одной записи рассчитывается отношение краткосрочной и долгосрочной оценок энергии или абсолютной амплитуды. Начало события фиксируется по верхнему порогу, окончание – по нижнему. Два порога уменьшают вероятность многократного разбиения одного импульса. Для трехкомпонентной станции расчет может выполняться по результирующему вектору или по выбранной компоненте, а примененный вариант сохраняется в настройках.

В распределенной сети срабатывания разных станций дополнительно сравниваются по времени. Если моменты начала попадают в допустимый интервал, записи объединяются в одно событие. Величина этого интервала зависит от расстояний между пунктами наблюдения и времени распространения волн. В результате один массовый взрыв не формирует несколько независимых карточек события.

После детектирования рассчитываются PPV и дополнительные характеристики выделенного импульса. Для сопоставления фактических данных с инженерными прогнозами в информационной модели сохраняется классическая зависимость PPV от масштабированного расстояния [1, 2, 7].

$$PPV = k \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

где  $Q$  – масса заряда взрывчатого вещества на замедление, кг;  $R$  – расстояние от центра взрыва до точки наблюдения, м;  $k$  и  $\alpha$  – коэффициенты,

определяемые по данным мониторинга для конкретных горно-геологических условий.

Для каждого выделенного события определяется максимальная амплитуда скорости колебаний. Это значение используется как PPV. Кроме него рассчитываются частотные характеристики и длительность зарегистрированного импульса.

PPV рассчитывается отдельно по каждой компоненте. При необходимости дополнительно определяется максимум модуля результирующего вектора. В базе данных сохраняются оба варианта, поскольку в разных методиках может использоваться компонентное или векторное значение. Доминирующая частота определяется по максимуму амплитудного спектра в пределах события, а длительность – по интервалу между установленными границами импульса.

Энергетический показатель используется как дополнительная характеристика и не подменяет PPV. Для сравнения событий на разных пунктах наблюдения вместе с расчетными параметрами сохраняются координаты, расстояние до взрывного блока, масса заряда на ступень замедления и другие доступные сведения из проекта массового взрыва.

Перед сохранением результата проверяются выход сигнала за измерительный диапазон канала, доля пропущенных отсчетов, отношение сигнал/шум и корректность временной синхронизации. Записи с критическими нарушениями получают признак непригодности

Таблица 1. Основные параметры сейсмических событий, рассчитываемые в ПАК МСГП

Table 1. Main parameters of seismic events calculated in the PAK MSGP system

| Параметр             | Описание                                                                                       |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PPV                  | Пиковая скорость смещения частиц массива, характеризующая интенсивность сейсмических колебаний |
| Доминирующая частота | Частота, соответствующая максимуму спектральной плотности сигнала                              |
| Длительность события | Временной интервал зарегистрированного сейсмического импульса                                  |
| Энергетический класс | Показатель энергетического уровня зарегистрированного события                                  |

для количественного анализа, но остаются в архиве для последующей проверки оборудования и алгоритмов.

Обобщенный алгоритм обработки сейсмических сигналов, реализуемый в программно-аппаратном комплексе ПАК МСГП, представлен на Рис. 2.

## Алгоритм обработки сейсмических сигналов в ПАК МСГП

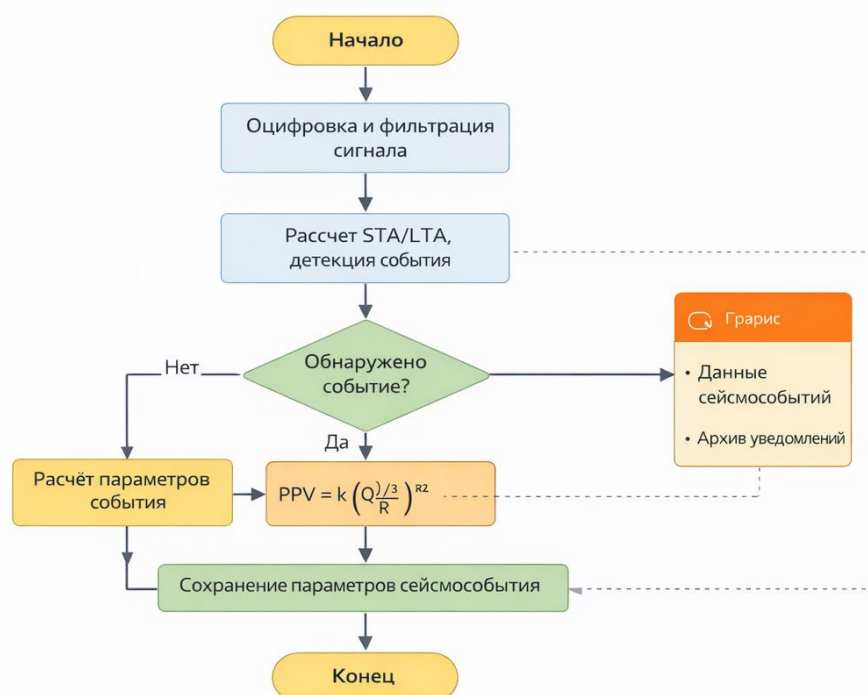


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки сейсмических сигналов в ПАК МСГП  
 Fig. 2. Flowchart of seismic signal processing in PAK MSGP

Основные параметры, рассчитываемые при обработке сейсмических сигналов в программно-аппаратном комплексе ПАК МСГП, представлены в Таблице 1.

Обобщенный алгоритм обработки сейсмических сигналов в программно-аппаратном комплексе ПАК МСГП включает следующие этапы:

1. Считывание временных рядов сейсмических сигналов с датчиков.
2. Предварительная цифровая фильтрация сигналов.
3. Детектирование событий методом STA/LTA [15–17].
4. Расчет параметров сейсмических колебаний (PPV, доминирующая частота, длительность импульса).
5. Сохранение параметров события в базе данных.
6. Передача результатов обработки в пользовательские интерфейсы системы.

В результате получается единая последовательность обработки: прием временного ряда, его подготовка, детектирование, расчет параметров события, запись результата в базу и передача пользователю. Значения настроек и работоспособность этой последовательности должны быть проверены на

экспериментальных и производственных записях.

Для такой проверки заранее определен набор показателей: полнота регистрации, доля потерянных пакетов, точность временной синхронизации, число ложных и пропущенных срабатываний, отклонение рассчитанного PPV от контрольного значения, задержка появления карточки события и доступность архива. В настоящей статье эти величины не приводятся, поскольку они относятся к следующему этапу испытаний.

### 3. Результаты исследования

#### 3.1 Структурно-функциональная модель программного комплекса

В разработанной схеме выделены четыре уровня: регистрация, аналитическая обработка, централизованное хранение и пользовательский доступ. Для каждого уровня заданы его функции, входные данные и формируемый результат. Регистрационный уровень не интерпретирует сигнал, аналитический уровень не зависит от типа пользовательского клиента, а клиент не изменяет исходные записи и уже рассчитанные параметры.

После получения записи система проверяет ее качество и сохраняет исходный временной ряд. Затем запись поступает в аналитический модуль. При обнаружении события ему присваивается идентификатор, с которым связываются записи с

разных пунктов наблюдения, рассчитанные параметры и настройки обработки. Если расчет выполняется повторно, предыдущий результат не удаляется, а сохраняется новая версия.

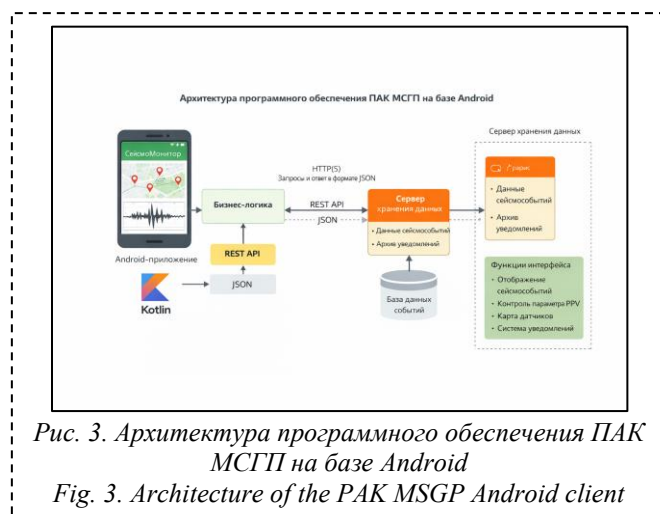


Рис. 3. Архитектура программного обеспечения ПАК МСГП на базе Android

Fig. 3. Architecture of the PAK MSGP Android client

В хранилище выделены отдельные наборы данных для пунктов наблюдения, исходных записей, зарегистрированных событий, расчетных параметров, массовых взрывов и конфигураций алгоритмов. Такая структура позволяет вернуться к конкретной сейсмограмме, определить, каким алгоритмом она была обработана, сравнить PPV по разным пунктам и сформировать выборку для статистического или машинного анализа.

Для комплекса предусмотрены два сценария работы. Первый используется непосредственно при мониторинге: запись принимается, обрабатывается и после детектирования события результат становится доступен пользователю. Второй предназначен для исследований. Специалист работает с накопленным архивом, меняет настройки или алгоритм и сравнивает новый расчет с предыдущим без изменения исходной записи.

Внешним информационным системам данные выдаются через программный интерфейс. Базовый ответ содержит идентификатор события, время, пункт наблюдения, PPV, частоту, длительность и признаки качества. При расширенном запросе могут передаваться параметры взрыва и ссылка на исходную запись. За счет этого интеграция с другими цифровыми системами не зависит от конкретного пользовательского приложения ПАК МСГП.

При увеличении числа датчиков в справочник добавляются новые источники, а формат входящих пакетов для аналитического модуля остается прежним. Новый пользовательский клиент также не требует копирования алгоритмов обработки, поскольку получает результаты с сервера. Масштабирование выполняется за счет добавления однотипных

источников и клиентов, а не переноса вычислительных функций между уровнями.

### 3.2 Архитектура пользовательского программного уровня ПАК МСГП

Пользовательский уровень ПАК МСГП предназначен для просмотра результатов обработки и состояния пунктов наблюдения. Вычислительно емкие операции остаются на серверной стороне. Для мобильного доступа в структуру комплекса включен Android-клиент, через который можно просматривать зарегистрированные события, параметры пунктов и служебную информацию о работе системы.

Android выбран как вариант мобильного клиента с учетом распространенности платформы и поддержки беспроводных каналов связи. Приложение обращается к центральному серверу и не выполняет функции аналитического ядра. Поэтому изменение алгоритмов обработки не требует переноса их новой версии на каждое мобильное устройство.

В Android-клиенте выделены модуль авторизации, обмен данными с сервером, визуализация параметров событий, картографический модуль и уведомления. Эти компоненты работают с одними и теми же данными, полученными от серверной части комплекса.

На мобильном устройстве выполняются прием и отображение подготовленных результатов, а также доступ к архиву событий. Сервер формирует ответы на запросы клиента, получает необходимые записи из базы данных и передает параметры события в структурированном виде. Обобщенная схема этого взаимодействия показана на Рис. 3.

Для обмена данными между Android-клиентом и серверной частью предложена модель REST API. Структурированная передача данных в формате JSON позволяет унифицировать сообщения о событиях, датчиках, координатах пунктов наблюдения и результатах обработки. Выбор конкретной схемы авторизации, механизмов шифрования и политики повторной передачи должен выполняться при разработке опытного образца с учетом информационной инфраструктуры предприятия.

С учетом задач производственного применения программное обеспечение на базе Android должно обеспечивать решение нескольких основных функциональных задач: отображение списка зарегистрированных сейсмических событий, просмотр параметров конкретного события, контроль значений PPV, визуализацию расположения датчиков и точек регистрации, а также предоставление доступа к архиву наблюдений за выбранный временной

период. Кроме того, важной функцией является формирование уведомлений при превышении установленных контрольных уровней сейсмических колебаний.

Для повышения удобства использования мобильный интерфейс должен строиться по принципу иерархической навигации. Начальный экран может содержать сводную информацию о текущем состоянии системы мониторинга, количестве активных датчиков, последних зарегистрированных событиях и максимальных значениях PPV за выбранный интервал времени. Из данного раздела пользователь получает доступ к детализированным карточкам событий, журналу уведомлений и картографическому модулю.

Таблица 2. Основные функции программного обеспечения ПАК МСГП на базе Android  
Table 2. Main functions of the PAK MSGP Android software.

| Функция                 | Назначение                                                                                                                  |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Просмотр событий        | Отображение перечня зарегистрированных сейсмических событий с возможностью сортировки по времени и уровню воздействия.      |
| Контроль параметров PPV | Оперативный просмотр максимальных значений пиковой скорости смещения частиц массива.                                        |
| Картографический модуль | Отображение расположения датчиков, пунктов наблюдения и зарегистрированных событий на схеме участка.                        |
| Архив наблюдений        | Доступ к историческим данным мониторинга за выбранный период времени.                                                       |
| Система уведомлений     | Передача предупреждений пользователю при превышении контрольных уровней сейсмических колебаний или потере связи с датчиком. |

Карточка зарегистрированного события должна включать дату и время регистрации, идентификатор датчика, координаты пункта наблюдения, значения PPV, доминирующей частоты и длительности колебаний. Представление результатов в унифицированном виде повышает удобство инженерного анализа и обеспечивает сопоставимость данных, полученных в различных точках наблюдательной сети. Основные функции программного

обеспечения на базе Android приведены в Таблице 2.

Для функции уведомлений предусмотрено формирование сообщения при превышении установленного контрольного уровня либо при потере связи с датчиком. Пороговые значения должны храниться в конфигурации системы и задаваться ответственным специалистом для конкретного объекта и условий наблюдения.

Программное обеспечение на базе Android также должно учитывать требования к надежности и устойчивости работы в полевых условиях. К числу таких требований относятся минимизация объема передаваемых данных, возможность повторного запроса информации при нестабильной связи, кэширование последних

полученных результатов и обеспечение разграничения пользовательских прав доступа. Для производственной эксплуатации также важны простота интерфейса и ограничение числа действий, необходимых для получения ключевых параметров события.

Для предотвращения неоднозначного толкования результатов пользовательский интерфейс должен отображать не только числовое значение, но и единицу измерения, компоненту или способ расчета результирующего PPV, дату обработки и признак качества. При наличии нескольких версий расчета карточка события должна показывать активную версию и обеспечивать переход к истории изменений.

Картографический модуль рассматривается как средство пространственной привязки результатов, а не как самостоятельный расчетный блок. Координаты пунктов поступают из серверного справочника, статус связи обновляется по данным регистрации, а события отображаются с учетом выбранного временного интервала. Такой подход исключает хранение независимой копии координат на мобильном устройстве.

При нестабильной связи клиент сохраняет последние полученные карточки и конфигурационную информацию в локальном кэше. Изменение контрольных уровней, подтверждение тревожного сообщения и доступ к исходным записям должны требовать авторизации и фиксироваться в журнале действий. Эти требования формируют основу для дальнейшей программной реализации, но не подменяют производственные испытания.

Таким образом, предложенная архитектура Android-клиента обеспечивает отделение пользовательского представления от аналитического ядра, унифицированный доступ к архиву событий и возможность оперативного

получения результатов мониторинга. На данном этапе архитектура носит проектный характер и требует программной реализации и испытаний.

#### 4. Обсуждение

В данной работе не ставилась задача подтвердить готовность ПАК МСПП к промышленной эксплуатации. Полученный результат представляет собой архитектуру программного комплекса и описание движения данных от регистрации сигнала до получения пользователем параметров сейсмического события. Отдельно определены правила хранения исходной записи и результатов ее обработки.

В отличие от работ, сосредоточенных преимущественно на прогнозировании PPV с использованием эмпирических и интеллектуальных моделей [13–14], а также на детектировании [15, 16, 17] и разметке сейсмических фаз [18, 19, 20], предложенное решение объединяет указанные операции в единый программный контур. При этом известные методы фильтрации и STA/LTA не рассматриваются как самостоятельная научная новизна; их роль состоит в формировании воспроизводимой последовательности обработки внутри ПАК МСПП.

Опыт отечественных систем показывает, что распределенная регистрация и централизованное накопление сейсмических данных технически реализуемы [21, 22]. В предлагаемой структуре дополнительно разделены исходные временные ряды, версии расчетных параметров и пользовательское представление. Для исследовательской эксплуатации это принципиально, поскольку настройки и алгоритмы могут меняться по мере накопления производственных данных.

PPV принят в качестве основного параметра интенсивности колебаний, поскольку он широко используется в инженерной практике [23, 24, 25]. Одного максимального значения при этом недостаточно для полного описания зарегистрированного сигнала. Поэтому вместе с PPV сохраняются частота, длительность, компоненты сигнала и другие сведения, необходимые для последующего анализа [26].

К результатам работы относятся разделение программного комплекса на аналитический, серверный и клиентский уровни, формирование структуры данных сейсмического события и возможность повторно обрабатывать архив без изменения исходных записей. Такая схема предназначена для накопления сопоставимых данных, на основании которых в дальнейшем может анализироваться связь параметров буровзрывных работ с реакцией массива.

Отделение мобильного клиента от аналитического ядра исключает необходимость поддерживать несколько копий расчетных

алгоритмов на пользовательских устройствах. При этом возрастает роль серверной части и каналов связи. Поэтому в архитектуре предусмотрены буферизация на уровне регистрации, локальное кэширование последних результатов, журналирование операций и возможность восстановить обработку из исходного архива.

Основное ограничение настоящей работы связано с тем, что предложенная архитектура пока не прошла производственную верификацию. Поэтому в статье не приводятся значения ошибок детектирования, задержек передачи данных и точности автоматического расчета PPV. Диапазоны фильтрации, параметры STA/LTA и контрольные уровни также должны определяться по данным конкретного объекта.

При испытаниях автоматическое выделение событий необходимо сопоставить с экспертной разметкой. Отдельно следует определить число ложных и пропущенных срабатываний, ошибку расчета PPV, синхронность станций и устойчивость передачи при нарушениях связи. Повторная обработка должна выполняться без изменения исходных записей.

Следующий этап состоит в реализации опытного программного комплекса и обработке размеченной выборки производственных сигналов. После настройки алгоритмов для конкретных горно-геологических условий можно оценить эксплуатационные показатели. Накопленный архив в дальнейшем может использоваться для статистического анализа, прогноза PPV, классификации источников колебаний и оценки изменения реакции массива во времени.

#### 5. Выводы

В работе разработана модульная архитектура программного обеспечения ПАК МСПП. В ней выделены регистрационный, аналитический, серверный и пользовательский уровни.

Для сейсмического события определен состав исходных и расчетных данных. Исходная трехкомпонентная запись сохраняется вместе со сведениями о пункте наблюдения, параметрами массового взрыва, результатами обработки, признаками качества и версией используемого алгоритма.

Последовательность обработки включает контроль входных данных, фильтрацию сигнала, детектирование события методом STA/LTA, расчет PPV и дополнительных параметров, сохранение результата и передачу его пользовательскому приложению.

Для мобильного доступа предложен Android-клиент, который выполняет функции отображения, картографического представления и доступа к архиву, но не дублирует вычисления аналитического ядра.

Объединение регистрации, обработки, хранения и отображения в одной структуре позволяет сохранять исходную запись и повторно рассчитывать ее параметры при изменении алгоритма или его настроек.

Следующий этап работы связан с реализацией опытного образца и проверкой архитектуры на производственных сейсмических записях с количественной оценкой полноты регистрации, достоверности детектирования, точности расчета параметров и задержки выдачи результата.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kahriman A. Analysis of ground vibrations caused by bench blasting at Can Open-pit Lignite Mine in Turkey // *Environmental Geology*. 2002. Vol. 41. Iss. 6. Pp. 653–661. DOI: 10.1007/s00254-001-0446-2.
2. Singh P. K., Roy M. P. Damage to surface structures due to blast vibration // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2010. Vol. 47. Iss. 6. Pp. 949–961. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2010.06.010.
3. 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. Iss. 7. Pp. 1214–1222. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2009.03.004.
4. Monjezi M., Ahmadi M., Sheikhan M., Bahrami A., Salimi A. R. Predicting blast-induced ground vibration using various types of neural networks // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2010. Vol. 30. Iss. 11. Pp. 1233–1236. DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.05.005.
5. Monjezi M., Ghafurikalajahi M., Bahrami A. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011. Vol. 26. Iss. 1. Pp. 46–50. DOI: 10.1016/j.tust.2010.05.002.
6. Kostić S., Perc M., Vasović N., Trajković S. Predictions of experimentally observed stochastic ground vibrations induced by blasting // *PLOS ONE*. 2013. Vol. 8. Iss. 12. Art. e82056. DOI: 10.1371/journal.pone.0082056.
7. Rajabi A. M., Vafaei A. Prediction of blast-induced ground vibration using empirical models and artificial neural network (Bakhtiari Dam access tunnel, as a case study) // *Journal of Vibration and Control*. 2020. Vol. 26. Iss. 7–8. Pp. 520–531. DOI: 10.1177/1077546319889844.
8. Jelušić P., Ivanić A., Lubej S. Prediction of blast-induced ground vibration using an adaptive network-based fuzzy inference system // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 1. Art. 203. DOI: 10.3390/app11010203.
9. Ragam P., Komalla A. R., Kanne N. Estimation of blast-induced peak particle velocity using ensemble machine learning algorithms: a case study // *Noise & Vibration Worldwide*. 2022. Vol. 53. Iss. 7–8. Pp. 404–413. DOI: 10.1177/09574565221114662.
10. 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. Art. 6591. DOI: 10.1038/s41598-023-33796-7.
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. Iss. 9. Art. 3759. DOI: 10.3390/app14093759.
12. Fissaha Y., Khattai 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. Art. 20026. DOI: 10.1038/s41598-024-70939-w.
13. Bozkurt Keser S., Yavuz M., Erdogan Erten G. Advancing the prediction and evaluation of blast-induced ground vibration using deep ensemble learning with uncertainty assessment // *Geosciences*. 2025. Vol. 15. Iss. 5. Art. 182. DOI: 10.3390/geosciences15050182.
14. 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. Art. 3999. DOI: 10.1038/s41598-025-86827-w.
15. Allen R. V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1978. Vol. 68. Iss. 5. Pp. 1521–1532. DOI: 10.1785/bssa0680051521.
16. Withers M., Aster R., Young C., Beiriger J., Harris M., Moore S., Trujillo J. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1998. Vol. 88. Iss. 1. Pp. 95–106. DOI: 10.1785/BSSA0880010095.
17. Akram J., Eaton D. W. A review and appraisal of arrival-time picking methods for downhole microseismic data // *Geophysics*. 2016. Vol. 81. Iss. 2. Pp. KS71–KS91. DOI: 10.1190/geo2014-0500.1.
18. Ross Z. E., Meier M.-A., Hauksson E., Heaton T. H. Generalized seismic phase detection with deep learning // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2018. Vol. 108. Iss. 5A. Pp. 2894–2901. DOI: 10.1785/0120180080.
19. Zhu W., Beroza G. C. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method // *Geophysical Journal International*. 2019. Vol. 216. Iss. 1. Pp. 261–273. DOI: 10.1093/gji/ggy423.
20. Soto H., Schurr B. DeepPhasePick: a method for detecting and picking seismic phases from local earthquakes based on highly optimized convolutional and recurrent deep neural networks // *Geophysical Journal International*. 2021. Vol. 227. Iss. 2. Pp. 1268–1294. DOI: 10.1093/gji/ggab266.

21. Асминг В. Э., Федоров А. В., Федоров И. С., Онуприенко В. С., Стрешнев А. А. Автоматизированная система сейсмического мониторинга Восточного рудника КФ АО «Апатит»: программно-аппаратные решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 8. С. 45–62. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_8\_0\_45.

22. Малинин Ю. А., Гриб Н. Н. Повышение эффективности и безопасности буровзрывных работ на Эльгинском каменноугольном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12-1. С. 100–115. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_100.

23. Волошин В. А., Ермаков А. Ю., Разумов Е. А., Кузин Е. Г. Геомеханическое обоснования порядка отработки пласта 16 шахты «Юбилейная» с учетом природных и техногенных сейсמודинамических процессов // Вестник Кузбасского государственного технического

университета. 2023. № 5 (159). С. 81–91. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-81-91.

24. Клыков А. Е., Клыков Е. С., Широколов Г. В. Напряженное состояние горного массива и расчет смещений в выработке. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 4 (134). С. 17–22. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-4-17-22.

25. Nikitenko S. M., Goosen E. V., Rozhkov A. A., Korolev M. K. Digital twins and digital technologies: specific features and prospects in the coal industry. Mining Science and Technology (Russia). 2025. Vol. 10(3). Pp. 298–305. DOI: 10.17073/2500-0632-2025-04-402.

26. Дарбинян Т. П., Федосеев А. В., Яваров А. В., Тяпкина П. А. Критерии оценки сейсмического воздействия взрывных работ на здания и сооружения в мировой практике и нормативных документах // Горный журнал. 2024. № 3. С. 17–24. DOI: 10.17580/gzh.2024.03.02.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Федченко Дмитрий Владимирович** – соискатель, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, e-mail: fedfromsib@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9991-9950>

**Еременко Андрей Андреевич** – главный научный сотрудник, д.т.н., чл.-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, e-mail: [veryom@misd.ru](mailto:veryom@misd.ru)

Заявленный вклад авторов:

Федченко Дмитрий Владимирович – постановка исследовательской задачи, сбор и анализ данных, написание текста.

Еременко Андрей Андреевич – постановка исследовательской задачи, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

### SOFTWARE ARCHITECTURE OF A ROCK MASS CONDITION MONITORING SYSTEM FOR DRILLING AND BLASTING OPERATIONS

Dmitry V. Fedchenko\*,  
Andrey A. Eremenko

N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

\* for correspondence: fedfromsib@gmail.com



#### Abstract.

The relevance of the study is determined by the need to move from isolated measurements and post-event analysis of seismic oscillation parameters to

**Article info**

Received:

15 August 2026

Accepted for publication:

01 September 2026

Accepted:

15 September 2026

**Keywords:** drilling and blasting; technogenic seismicity; rock mass condition; seismic monitoring; peak particle velocity; signal processing; hardware-software system; software architecture

systematic digital monitoring of the rock mass response to blasting. Existing studies mainly address peak particle velocity prediction, automatic event detection, or individual recording tools, whereas coordinated interaction between monitoring software components remains insufficiently developed. The paper substantiates the software architecture of a hardware-software system for rock mass condition monitoring during drilling and blasting operations (PAK MSGP). The methodology is based on systems analysis, structural-functional modelling, and decomposition of seismic data acquisition, processing, storage, and presentation processes. A modular architecture is proposed that includes subsystems for acquiring and synchronizing signals from a distributed network of three-component sensors, input-data quality control, preliminary digital processing, automatic event detection, calculation of oscillation parameters, centralized storage, and user access. An algorithmic workflow is formed that provides validation and band-pass filtering of time series, STA/LTA event detection, and determination of peak particle velocity, dominant frequency, and impulse duration. The separation of the analytical core, server layer, and Android-based mobile client software is substantiated. The result of the study is a structural-functional software model of PAK MSGP that creates a basis for accumulating comparable data on technogenic seismic events, reprocessing raw records, and subsequently verifying digital methods used to interpret rock mass condition. The proposed functional separation prevents duplication of computational operations on mobile devices, supports system scalability, and allows additional analytical algorithms to be integrated without changing the basic data-acquisition logic.

**For citation:** Fedchenko D.V., Eremenko A.A. Software architecture of a rock mass condition monitoring system for drilling and blasting operations. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):177-189. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-177-189, EDN: DFIGLI

**Acknowledgements**

The authors express their gratitude to the colleagues and specialists who contributed to the discussion of the study results, as well as to the anonymous reviewers for their constructive comments that helped improve the manuscript.

**REFERENCES**

1. Kahrman A. Analysis of ground vibrations caused by bench blasting at Can Open-pit Lignite Mine in Turkey. *Environmental Geology*. 2002; 41(6):653-661. (In Eng.) DOI: 10.1007/s00254-001-0446-2.
2. Singh P.K., Roy M.P. Damage to surface structures due to blast vibration. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2010; 47(6):949-961. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.06.010.
3. Khandelwal M., Singh T.N. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009; 46(7):1214-1222. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.03.004.
4. Monjezi M., Ahmadi M., Sheikhan M., Bahrami A., Salimi A.R. Predicting blast-induced ground vibration using various types of neural networks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2010; 30(11):1233-1236. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.05.005.
5. Monjezi M., Ghafurikalajahi M., Bahrami A. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011; 26(1):46-50. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.tust.2010.05.002.
6. Kostić S., Perc M., Vasović N., Trajković S. Predictions of experimentally observed stochastic ground vibrations induced by blasting. *PLOS ONE*. 2013; 8(12). Art. e82056. (In Eng.) DOI: 10.1371/journal.pone.0082056.
7. Rajabi A.M., Vafaei A. Prediction of blast-induced ground vibration using empirical models and artificial neural network (Bakhtiari Dam access tunnel, as a case study). *Journal of Vibration and Control*. 2020; 26(7-8):520-531. (In Eng.) DOI: 10.1177/1077546319889844.
8. Jelušić P., Ivanić A., Lubej S. Prediction of blast-induced ground vibration using an adaptive network-based fuzzy inference system. *Applied Sciences*. 2021; 11(1):203. (In Eng.) DOI: 10.3390/app11010203.
9. Ragam P., Komalla A.R., Kanne N. Estimation of blast-induced peak particle velocity using ensemble machine learning algorithms: a case study. *Noise & Vibration Worldwide*. 2022; 53(7-8):404-413. (In Eng.) DOI: 10.1177/09574565221114662.
10. 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; 13. Art. 6591. (In Eng.) DOI: 10.1038/s41598-023-33796-7.
11. Zhao S., Wang L., Cao M. Chaos Game Optimization-hybridized artificial neural network for predicting blast-induced ground vibration. *Applied Sciences*. 2024; 14(9). Art. 3759. (In Eng.) DOI: 10.3390/app14093759.

12. Fissah 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; 14. Art. 20026. (In Eng.) DOI: 10.1038/s41598-024-70939-w.

13. Bozkurt Keser S., Yavuz M., Erdogan Erten G. Advancing the prediction and evaluation of blast-induced ground vibration using deep ensemble learning with uncertainty assessment. *Geosciences*. 2025; 15(5). Art. 182. (In Eng.) DOI: 10.3390/geosciences15050182.

14. 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; 15. Art. 3999. (In Eng.) DOI: 10.1038/s41598-025-86827-w.

15. Allen R.V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1978; 68(5):1521-1532. (In Eng.) DOI: 10.1785/bssa0680051521.

16. Withers M., Aster R., Young C., Beiriger J., Harris M., Moore S., Trujillo J. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1998; 88(1):95-106. (In Eng.) DOI: 10.1785/BSSA0880010095.

17. Akram J., Eaton D.W. A review and appraisal of arrival-time picking methods for downhole microseismic data. *Geophysics*. 2016; 81(2):KS71-KS91. (In Eng.) DOI: 10.1190/geo2014-0500.1.

18. Ross Z.E., Meier M.-A., Hauksson E., Heaton T.H. Generalized seismic phase detection with deep learning. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2018; 108(5A):2894-2901. (In Eng.) DOI: 10.1785/0120180080.

19. Zhu W., Beroza G.C. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophysical Journal International*. 2019; 216(1):261-273. (In Eng.) DOI: 10.1093/gji/ggy423.

20. Soto H., Schurr B. DeepPhasePick: a method for detecting and picking seismic phases from local earthquakes based on highly optimized convolutional and recurrent deep neural networks. *Geophysical Journal International*. 2021; 227(2):1268-1294. (In Eng.) DOI: 10.1093/gji/ggab266.

21. Asming V.E., Fedorov A.V., Fedorov I.S., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Automated seismic monitoring in Vostochny Mine of Apatit's Kola Branch: hardware/software solutions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; 8:45-62. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_8\_0\_45.

22. Malinin Yu.A., Grib N.N. Improving the efficiency and safety of drilling and blasting operations at the Elga coal deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; 12-1:100-115. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_100.

23. Voloshin V.A., Ermakov A.Yu., Razumov E.A., Kuzin E.G. Geomechanical substantiation of the mining procedure for seam 16 of the Yubileynaya mine taking into account natural and man-made seismodynamic processes. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2023; 5(159):81-91. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-81-91.

24. Klykov A.E., Klykov E.S., Shirokolobov G.V. Stress state of the rock mass and calculation of displacements in the workings. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2019; 4(134):17-22. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-4-17-22.

25. Nikitenko S.M., Goosen E.V., Rozhkov A.A., Korolev M.K. Digital twins and digital technologies: specific features and prospects in the coal industry. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025; 10(3):298-305. DOI: 10.17073/2500-0632-2025-04-402.

26. Darbinyan T.P., Fedoseev A.V., Yavarov A.V., Tyapkina P.A. Evaluation criteria of blasting-induced seismic effect on buildings and structures in global practices and in regulatory documents. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(3):17-24. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.17580/gzh.2024.03.02.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

#### About the authors:

**Dmitry V. Fedchenko** – degree applicant, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, (54 Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russian Federation), e-mail: fedfromsib@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9991-9950>

**Andrey A. Eremenko** – chief researcher, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, (54 Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russian Federation), e-mail: yeryom@misd.ru

#### Contribution of the authors:

Dmitry V. Fedchenko – setting a research task, collecting and analyzing data, writing a text.

Andrey A. Eremenko – formulation of a research problem, conclusions, writing a text.

All authors have read and approved the final manuscript.

