

Концепция малоапертурной сейсмической антенны как средства оценивания уровня вибрационного загрязнения территорий, прилегающих к горнопромышленным предприятиям

М.С. Икренников^{1, 2} ✉, С.И. Нефедов^{1, 2}, А.Г. Собеневский¹, А.З. Вартанов^{1, 2}

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

² Высшая школа экономики, г. Москва, Российская Федерация

✉ ikrennikov@yandex.ru

Резюме: Обосновано применение принципов инженерии управления для формирования комплексной системы безопасности промышленных предприятий, с уделением особого внимания защите от вибрационного воздействия на прилегающие территории. Рассматривается ключевая роль высокоточного мониторинга вибраций в решении этой задачи. В качестве перспективной альтернативы традиционным сетям сейсмических станций, применяемым для контроля вибрационного загрязнения от горнодобывающих предприятий, предлагается использование малоапертурной сейсмической антенны. На примере расчётного моделирования показано, что данная система способна не только фиксировать, но и проводить селекцию слабых сигналов, определяя расстояние до источника возмущения на уровне антенны, а также оценивать параметры продолжительной вибрации от группы объектов. Внедрение таких систем формирует основу для создания замкнутого контура управления. Подчёркивается, что предлагаемый подход обеспечивает повышенную точность, наглядность результатов и экономическую эффективность контроля вибрационного загрязнения от горнодобывающих предприятий на находящиеся рядом охраняемые объекты.

Ключевые слова: инженерия управления, комплексная безопасность, вибрационные загрязнения, горная экология, малоапертурная сейсмическая антенна, автоматизация системы мониторинга, селекция слабых сигналов

Для цитирования: Икренников М.С., Нефедов С.И., Собеневский А.Г., Вартанов А.З. Концепция малоапертурной сейсмической антенны как средства оценивания уровня вибрационного загрязнения территорий, прилегающих к горнопромышленным предприятиям. *Горная промышленность*. 2026;(2):97–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-97-102>

Concept of low-aperture seismic array as a tool for evaluating the level of vibration pollution in the areas adjacent to industrial operations

M.S. Ikrennikov^{1, 2} ✉, S.I. Nefedov^{1, 2}, A.G. Sobenevskiy¹, A.Z. Vartanov^{1, 2}

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² HSE University, Moscow, Russian Federation

✉ ikrennikov@yandex.ru

Abstract: This article justifies application of engineering management principles to develop a comprehensive safety system for industrial companies, with a particular focus on mitigating vibration impact on adjacent territories. It highlights the critical role of high-precision vibration monitoring in addressing this task. It is proposed to use a small-aperture seismic array as a promising alternative to traditional seismic arrays used for monitoring vibration pollution from mining operations. Computational modeling demonstrates that this system is capable of not only detecting but also discriminating weak signals by determining the distance to the excitation source at the array level, as well as evaluating parameters of prolonged vibration from a group of objects. Implementation of such systems forms the basis for creating a closed-loop control circuit. It is emphasized that the proposed approach ensures enhanced accuracy, clear results, and cost-efficiency of monitoring vibration pollution from mining operations on the neighboring protected objects.

Keywords: engineering management, integrated safety, vibration pollution, mining ecology, low-aperture seismic array, automation of monitoring system, weak signal discrimination

For citation: Ikrennikov M.S., Nefedov S.I., Sobenevskiy A.G., Vartanov A.Z. Concept of low-aperture seismic array as a tool for evaluating the level of vibration pollution in the areas adjacent to industrial operations. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):97–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-97-102>

Введение

Вибрационное загрязнение территорий, прилегающих к горнопромышленным предприятиям, представляет собой нормируемый вид антропогенного воздействия. Его влияние на инфраструктурные объекты и населенные пункты делает данный фактор ключевым при оценке уровня комплексной и в первую очередь экологической безопасности¹.

В настоящее время управление подобными рисками зачастую носит реактивный, а не превентивный характер. Современный подход к обеспечению безопасности геодинамических систем, к которым относятся и горнопромышленные районы, должен, по мнению авторов, базироваться на принципах инженерии управления. Такой подход подразумевает создание замкнутой системы, сочетающей прецизионный мониторинг параметров геодинамических процессов с адресным воздействием на них для управления значениями ключевых критериев безопасности. Под адресным воздействием понимается комплекс целенаправленных и избирательных мер для уменьшения уровня вибрации до достижения воздействием допустимых уровней; этого можно достичь как корректировкой работы оборудования, так и созданием волнопрерывающих барьеров.

Реализация данного подхода требует создания специализированных измерительных систем, которые не только обеспечивают высокоточную оценку контролируемых параметров (таких, как уровень вибраций), но и позволяют однозначно идентифицировать источник возмущения, соотнеся измеренный сигнал с породившим его технологическим процессом. Особую актуальность это требование приобретает в контексте оценки вибрационного загрязнения, где фоновые шумы и множественные источники вибраций существенно затрудняют интерпретацию данных.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью перехода от констатации факта вибрационного загрязнения к активному управлению этим параметром на основе высокоточной и информативной системы мониторинга.

В контексте горнопромышленных предприятий вибрационное воздействие проявляется главным образом как результат буровзрывных работ или работы тяжелых горных машин. При этом оба источника могут приводить к возникновению нештатных ситуаций на прилегающих территориях. Анализ практических кейсов, проведенный в Квинсленде², выявил 12 типовых случаев повреждения инфраструктуры, что подтверждает практическую значимость проблемы.

Количественные исследования демонстрируют масштаб воздействия:

¹ ГОСТ Р 53964–2010. Вибрация. Измерения вибрации сооружений. Руководство по проведению измерений. М.: Стандартинформ; 2019. 16 с.; ГОСТ Р 52892–2007. Вибрация и удар. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. М.: Стандартинформ; 2007. 23 с.; ГОСТ Р ИСО 10137–2016. Основы расчета строительных конструкций. Эксплуатационная надежность зданий в условиях воздействия вибрации. М.: Стандартинформ; 2017. 36 с.

² Vibration Control in Mining: Case Studies from Queensland: Report of the Queensland Mining Industry Association. 2020. 45 p. Available at: <https://www.publications.qld.gov.au/dataset/queensland-mines-and-quarries-safety-performance-and-health-reports> (accessed: 04.06.2025).

1. Согласно исследованию [1] продолжительные вибрации даже низкой амплитуды могут приводить к образованию трещин и повреждению конструкций. Исследование, проведенное в сейсмически спокойном регионе США, показало, что длительная (до 8 ч) вибрация от промышленного оборудования с очень низкой PPV (всего ~0.37 мм/с или 0.0147 дюйм/с) на частотах 7–10 Гц привела к появлению трещин в домах на расстоянии 750 м. При этом нормативная база, учитывающая только пиковые воздействия составляла 12.7 мм/с (0.5 дюйм/с).

2. В Индонезии вибрации от взрывных работ приводили к повреждениям железнодорожного полотна и стрелочных переводов [2].

3. В Нигерии 72,2% респондентов, проживающих вблизи карьеров, связывают появление трещин в стенах своих домов с вибрациями от тяжелой техники [3]. Для России тоже характерно, когда люди, проживающие в непосредственной близости от ведения горных работ, жалуются на возникновение трещин в зданиях, но подобного опроса, чтобы оценить количественно процент людей, связывающих данные разрушения с ведением добычи, не проводилось.

Отдельную опасность представляет явление резонансного усиления в системе «грунт–фундамент–сооружение». Специальные исследования подчеркивают, что именно низкочастотные колебания обладают наибольшим разрушительным потенциалом, поскольку их энергия эффективно передается на значительные расстояния и совпадает с собственными частотами многих инженерных конструкций [1; 3]. Исследования взаимодействия грунта и конструкции подтверждают, что упрощенные модели часто завышают демпфирующую способность грунта, что в реальности приводит к более высоким резонансным амплитудам, чем прогнозируется [4]. Количественный анализ показывает, что в резонансном режиме амплитуда колебаний фундамента и опирающейся на него конструкции может в 3–7 раз превышать амплитуду колебаний свободного поля грунта [5]. Это многократно увеличивает риск ускоренного накопления усталостных повреждений и последующих разрушений.

Таким образом, оперативно реагировать на влияние вибрационного загрязнения необходимо на всех стадиях жизненного цикла горного предприятия. Важнейшим элементом этого процесса является создание системы контроля и мониторинга геодинамических процессов, которая интегрирует в себя высокоточное прогнозирование и реализацию инженерных превентивных мер по снижению вибрационной нагрузки, что в комплексе позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению рисками.

Система мониторинга на основе малоапертурной сейсмической антенны

Современные системы мониторинга вибрационного воздействия от горнопромышленных предприятий, как правило, основаны на двух подходах: использовании многопозиционных систем, развернутых по периметру предприятия, или применении однопозиционных стационарных и мобильных измерительных станций. Однако в условиях, требующих прецизионной оценки параметров и однозначной

идентификации источников вибрации, оба подхода демонстрируют ограниченную эффективность. Многопозиционные системы требуют значительных затрат на развертывание и синхронизацию, а однопозиционные станции не позволяют точно определить направление на источник и его локализовать из-за отсутствия базы для сравнения сигналов [6].

В качестве решения данной проблемы в работе предлагается концепция системы мониторинга на основе малоапертурной сейсмической антенны (МАСА). Данный подход, хорошо зарекомендовавший себя в сейсмологии для обнаружения слабых событий и определения параметров их очагов [7], адаптирован для задач промышленного вибрационного контроля. Ключевыми преимуществами МАСА являются:

1. Возможность установки в непосредственной близости от охраняемого объекта.
2. Высокая чувствительность к слабым вибрационным возмущениям и способность к их пространственной фильтрации и идентификации за счет когерентного сложения сигналов [8].

В отличие от классических систем, где расстояние между датчиками (база) выбирается из условия обеспечения необходимого временного разрешения для локации источника, в предлагаемой концепции МАСА датчики размещаются компактно. Это позволяет считать моменты прихода волнового фронта на различные датчики антенны практически одновременными. При этом, как показано в работах по теории волновых полей [9], даже незначительные колебания на малых базах приводят к существенным с точки зрения алгоритмов beamforming (лучеформирования) относительным изменениям в сигнале. Это позволяет выделять и идентифицировать слабые сейсмические события на фоне шумов.

Конструктивно предлагаемая система представляет собой группу (антенну) сейсмических датчиков, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга по определенной геометрии. В качестве базовых могут быть использованы конфигурации «креста» или концентрических окружностей, аналогичные применяемым в геофизике [10–12].

Фундаментальным требованием для работы МАСА является условие, при котором расстояние d между датчиками много меньше длины волны λ регистрируемых колебаний ($d \ll \lambda$). Это обеспечивает когерентность принимаемых сигналов и позволяет рассматривать волновой фронт на апертуре антенны как плоский [13]. Длина волны в массиве горных пород определяется выражением:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (1)$$

где λ – длина волны; v – скорость распространения волны в среде; f – частота.

Для примера, в гранитных породах скорости распространения продольных P и поперечных S волн составляют приблизительно 5000–6000 м/с и 3000 м/с соответственно [14]. Для верхней частоты рассматриваемого диапазона, 10 Гц (выбор обусловлен значительным затуханием высокочастотных составляющих в земной коре), длина поперечной волны составит $\lambda_S = 3000 / 10 = 300$ м. Для выполнения условия $d \ll \lambda$ с запасом, например, при $d \approx \lambda/100$, расстояние между датчиками должно составлять около трех метров. Данный расчет подтверждает практическую реализуемость компактной антенны.

Основной задачей системы являются определение азимута на источник сигнала и оценка дистанции до него. Рассмотрим алгоритм для антенны в виде одной концентрической окружности с одним датчиком в центре и $N-1$ датчиками, равномерно распределенными по окружности радиусом $R = 3$ м (рис. 1). Маленькими синими кружками обозначены сами датчики. Красной звездой обозначен источник возмущений.

Пеленг на источник принимается совпадающим с направлением на датчик на окружности, зафиксировавший максимальную амплитуду сигнала. Для расчета дальности используется отношение амплитуд сигналов на центральном и данном периферийном датчиках с учетом затухания волн в среде.

Оценка погрешности определения азимута является критически важной. Наихудший случай возникает, когда направление на источник совпадает с биссектрисой угла между двумя соседними датчиками. В этом случае ошибка φ составит:

$$\varphi \leq \frac{360}{2 \cdot (N - 1)}, \quad (2)$$

где φ – ошибка в градусах; N – общее количество датчиков в антенне. Так, для антенны с $N = 10$ датчиками (1 центральный + 9 на окружности) погрешность составит $\varphi \leq 180 / 9 = 20^\circ$.

Для точного расчёта дистанции x от центра антенны до источника в наихудшем сценарии используется теорема синусов и косинусов для треугольника, образованного источником, центральным датчиком и периферийным датчиком:

$$x = \sqrt{r^2 + R^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(180 - \arcsin\left(\frac{R \cdot \sin(\varphi)}{r}\right) - \varphi)}. \quad (3)$$

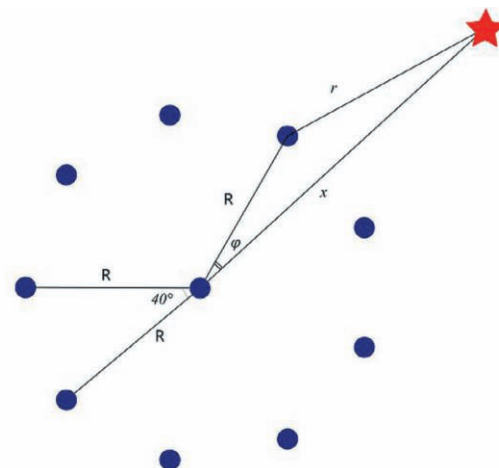


Рис. 1
Схематическое представление МАСА и источника возмущений

Fig. 1
A schematic representation of the low-aperture seismic array and the excitation source

Таким образом, применение МАСА открывает новые возможности для создания высокоточных и экономически эффективных систем мониторинга вибрационного загрязнения, позволяя перейти от простой регистрации факта вибрации к активной идентификации и локализации его источников.

Моделирование затухания вибраций и верификация метода дифференцирования слабых сигналов для МАСА

Для количественной оценки потенциала предложенной системы мониторинга необходимо смоделировать затухание вибрационных сигналов в грунте. Амплитуда сейсмических волн $A(r)$ на расстоянии r от источника описывается общепринятым уравнением, учитывающим два основных механизма ослабления: геометрическое рассеяние и поглощение в материале [15; 16]:

$$A(r) = \frac{A_0}{r^n} \cdot e^{-\alpha r}, \quad (4)$$

где A_0 – начальная амплитуда колебаний; r – расстояние от источника; n – показатель геометрического рассеяния; α – коэффициент поглощения среды.

Геометрическое рассеяние (множитель $1/r^n$) обусловлено распределением энергии волны по увеличивающемуся расстоянию волнового фронта и является доминирующим фактором на малых дистанциях. Поглощение (множитель $e^{-\alpha r}$), связанное с неупругими свойствами грунта, приводит к необратимому рассеянию энергии в тепло и становится определяющим на больших расстояниях.

Показатель геометрического рассеяния n не является строго константой и может зависеть от дистанции и типа волны. В рамках данного исследования для моделирования использована эмпирическая модель, полученная для рыхлых обводнённых грунтов на малых расстояниях [15]:

$$n(r) = 1 + 0,5 \cdot \tanh\left(\frac{r - r_{\text{крит}}}{r_{\text{крит}}}\right), \quad (5)$$

где $r_{\text{крит}}$ – критическое расстояние (эмпирический коэффициент), принятое в исходной модели равным 20 м. Данная модель адекватно описывает переход от цилиндрического ($n \approx 1$) к сферическому ($n \approx 1.5$) рассеянию по мере удаления от источника, что характерно для неглубоко залегающих источников вибрации в однородных средах.

Для валидации предложенного подхода был проведён модельный расчёт для антенны из 10 датчиков (1 центральный и 9 распределённых по окружности радиусом 3 м). На рис. 2 представлена зависимость разницы расстояний от центра антенны до источника и от периферийного датчика до источника. Как видно, с увеличением дистанции эта разница стремится к радиусу окружности ($R = 3$ м), а значительная погрешность возникает лишь в непосредственной близости от антенны ($r < 10$ м). Важно отметить, что данный диапазон не является целевым рабочим для задач контроля вибраций от удалённых горных предприятий. Более того, как показано далее, теоретическая разница амплитуд для столь близко расположенного источника весьма значительна, что делает задачу его дифференцирования простой, а влияние ошибки локации – несущественным.

На рис. 3 и 4 приведены расчётные зависимости отношения амплитуд на датчике с наибольшей амплитудой и центральном датчике для идеального случая (направление точно на датчик) и наихудшего случая (направление на биссектрису) для малых и больших расстояний соответственно. Эти зависимости являются ключевыми для предлагаемого амплитудного метода, так как позволяют оценивать расстояние до источника вибрации.

Ключевым результатом является анализ относительной ошибки между идеальным и наихудшим сценариями (рис. 5 и 6). Расчёт показывает, что для расстояний свыше

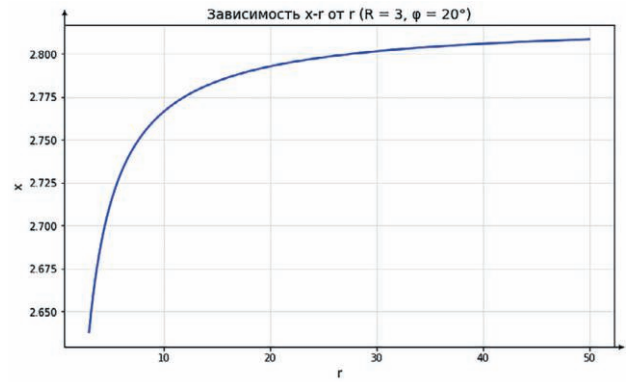


Рис. 2
Фактическая разница расстояния между источником возмущения с датчиком с наибольшей амплитудой r и центральным датчиком с источником возмущения x при максимальном возможном угле ошибки ($\varphi = 20^\circ$)

Fig. 2
The actual difference in the distance between the excitation source and the sensor with the largest amplitude r and between the central sensor and the excitation source x at the maximum possible error angle ($\varphi = 20^\circ$)

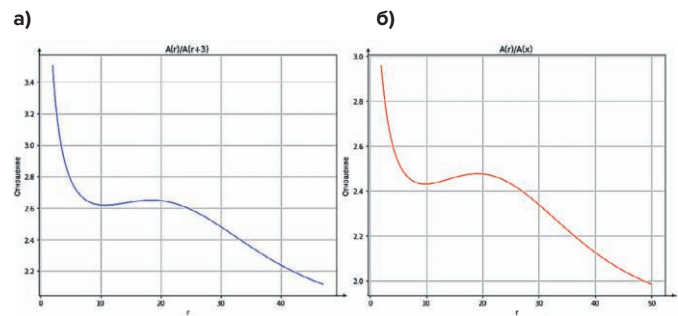


Рис. 3
Зависимость отношения амплитуд для идеального (а) и наихудшего (б) случаев для малых расстояний

Fig. 3
The dependence of the amplitude ratio for the ideal (a) and worst-case (b) scenarios for short distances

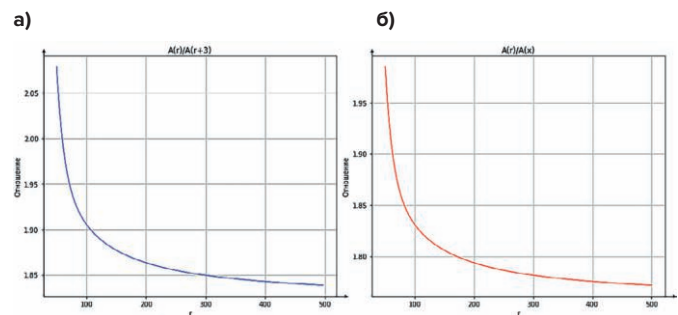


Рис. 4
Зависимость отношения амплитуд для идеального (а) и наихудшего (б) случаев для больших расстояний

Fig. 4
The dependence of the amplitude ratio for the ideal (a) and worst-case (b) scenarios for long distances

10 м расхождение в оценках амплитуд составляет менее 7%, а для дистанций свыше 50 м – не превышает 4%. Это свидетельствует о высокой робастности предложенного амплитудного метода локации, который сохраняет свою эффективность даже в условиях максимальной угловой погрешности.

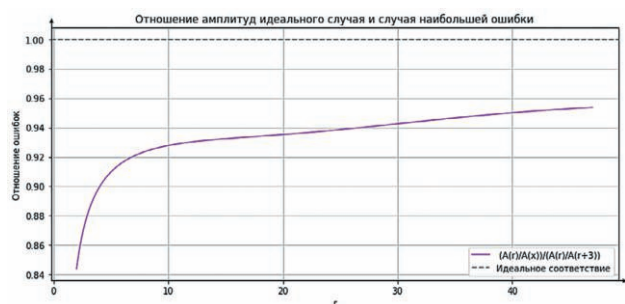


Рис. 5
Отношение амплитуд для идеального случая и случая наибольшей ошибки (малые расстояния)

Fig. 5
The amplitude ratio for the ideal case and the case with the largest error (short distances)

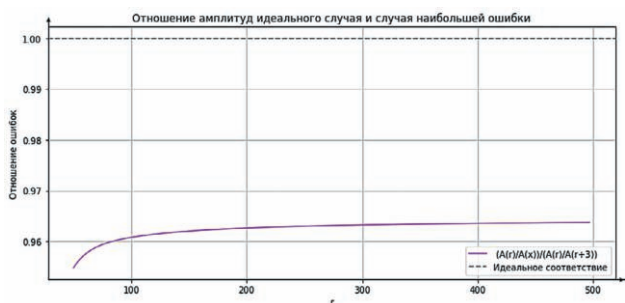


Рис. 6
Отношение амплитуд для идеального случая и случая наибольшей ошибки (большие расстояния)

Fig. 6
The amplitude ratio for the ideal case and the case with the largest error (long distances)

Обсуждение результатов и практическая значимость

Полученные результаты демонстрируют, что предложенная система на основе МАСА способна эффективно дифференцировать события по их амплитудным характеристикам. Это позволяет надёжно отделять близко расположенные помеховые события (на расстоянии нескольких метров) от целевых вибрационных воздействий, источниками которых являются технологические процессы на горно-предприятии, удалённом на сотни метров.

Важно подчеркнуть, что амплитудная локация в данном контексте не претендует на высокую точность определения координат. Её задача – эффективное разделение событий по зонам возникновения (населённый пункт или горное предприятие) путём оценки расстояния до источника и определения направления. Этот подход особенно актуален, учитывая, что совокупная работа горных машин представляет собой распределённый, а не точечный источник возмущения, что делает точный расчёт координат в традиционном понимании малоинформативным.

Ключевыми практическими преимуществами предложенной концепции являются:

1. **Низкие вычислительные затраты:** Алгоритм не требует сложной обработки временных рядов или построения скоростных моделей среды.

2. **Отказ от временных гипотез:** Система не зависит от ошибок автоматического детектирования вступлений волн (picking), которые являются одним из основных источников неопределённости в классических сейсмических методах [17].
3. **Экономическая эффективность:** Компактность антенны позволяет разворачивать систему непосредственно у охраняемых объектов, минимизируя затраты на инфраструктуру и кабельные трассы.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает целесообразность применения принципов инженерии управления для построения комплексной системы безопасности промышленного предприятия, ключевым элементом которой является управление вибрационным загрязнением.

В работе решена актуальная задача перехода от реактивного констатирования факта вибрационного воздействия к проактивному управлению рисками. Математически обоснована и предложена новая концепция построения системы мониторинга на основе малоапертурной сейсмической антенны (МАСА). Такая система позволяет определять уровень вибрационного загрязнения и определять его источник алгоритмически, без решения задач локации по нескольким датчикам. Это позволяет не решать задачу определения первых вступлений, что снижает расход на диспетчеризацию. Также такое решение сокращает количество отдельно стоящих станций, а возможность размещения рядом с охраняемым объектом, таким как населённый пункт, сокращает расходы решения задач обеспечения энергии, связи и синхронизации.

Проведенное моделирование, учитывающее современные модели затухания сейсмических волн в грунтах, подтвердило, что данный метод обеспечивает высокую надежность сепарации событий и точную идентификацию источников вибрации даже в условиях фоновых шумов и наихудшего случая пространственной локации. Это позволяет однозначно соотносить измеренный сигнал с породившим его технологическим процессом (будь то буровзрывные работы или работа тяжелой техники), что является критически важным для последующего адресного воздействия.

Предложенный подход позволяет создавать экономически эффективные и высокочувствительные системы, обеспечивающие не просто регистрацию, а интеллектуальный анализ вибрационного загрязнения в режиме, близком к реальному времени. Внедрение таких систем формирует основу для создания замкнутого контура управления: данные прецизионного мониторинга служат основой для принятия решений о корректировке режимов работы оборудования или сооружении волнопрерывающих барьеров, что в комплексе позволяет минимизировать риски повреждения инфраструктуры и перейти к проактивному обеспечению экологической и комплексной безопасности горнопромышленных предприятий.

Список литературы / References

1. Cronin V.S., Sverdrup K.A. Can long-duration vibrations damage structures at sub-critical particle velocities. *Geological Society of America*. 2004;36(3):18. Available at: <https://gsa.confex.com/gsa/2004NC/webprogram/Paper71548.html> (accessed: 23.02.2026).
2. Zhang S., Zhang Z., Wang K., He D., Huang Y. Research on the Impact of Blasting Vibration in Mining Areas on Surrounding Railway Structures. *Applied Sciences*. 2025;15(9):4624. <https://doi.org/10.3390/app15094624>

3. Taiwo T.M., Ogunbode T.O. Understanding environmental consequences of quarry operations: residents' perception study in the neighbourhood of a quarry in Osun state, Nigeria. *Environmental Health Insights*. 2024;18:1–7. <https://doi.org/10.1177/11786302241264146>
4. Auersch L. Soil-structure interaction and damping by the soil – effects of foundation groups, foundation flexibility, soil stiffness and layers. *Vibration*. 2025;8(1):5. <https://doi.org/10.3390/vibration8010005>
5. Kramer S.L., Stewart J.P. *Geotechnical Earthquake Engineering*. CRC Press; 2024. 1060 p. <https://doi.org/10.1201/9781003512011>
6. Fichtner A. *Full Seismic Waveform Modelling and Inversion*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011. 343 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15807-0>
7. Rost S., Thomas C. Array seismology: Methods and applications. *Reviews of Geophysics*. 2002;40(3):2-1–2-27. <https://doi.org/10.1029/2000RG000100>
8. Wan K., Sun X., Liu Y., Ren K., Sun X., Luo Y. Spatial Coherency model considering focal mechanism based on simulated ground motions. *Sustainability*. 2022;14(4):1989. <https://doi.org/10.3390/su14041989>
9. Claerbout J.F. *Fundamentals of geophysical data processing. With applications to petroleum prospecting*. Blackwell Scientific Publications; 1985. 284 p.
10. Green P.E., Kelly E.J., Levin M.J., A comparison of seismic array processing methods. *Geophysical Journal International*. 1966;11(1):67–84. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1966.tb03493.x>
11. Harjes H.-P., Jost M.L., Schweitzer J., Gestermann N. Automatic seismogram analysis at GERESS. *Computers & Geosciences*. 1993;19(2):157–166. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90113-J](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90113-J)
12. Кочарян Г.Г., Локтев Д.Н., Ряховский И.А., Санина И.А. Уникальная научная установка «среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево». *Геодинамика и тектонофизика*. 2022;13(2):0590. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0590>
Kocharyan G.G., Loktev D.N., Ryakhovsky I.A., Sanina I.A. Large-scale research facilities «mid-latitude geophysical observation complex «Mikhnevo». *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022;13(2):0590. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0590>
13. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*. 1969;57(8):1408–1418. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278>
14. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*. 2nd ed. Cambridge University Press; 2009. 511 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626753>
15. Ahmadi A.B., Morozov I. Separation of geometric spreading, scattering and intrinsic attenuation in VSP data. In: *GeoConvention 2013: Integration: Geoscience Engineering Partnership, Calgary, May 6–12, 2013*, pp. 1–6. Available at: https://geoconvention.com/wp-content/uploads/abstracts/2013/310_GC2013_Separation_of_GS_Scattering_Intrinsic_Attenuation_in_VSP_data.pdf (accessed: 04.06.2025).
16. Aki K., Richards P.G. *Quantitative Seismology*. 2nd ed. Sausalito, California: University Science Books; 2002. 700 p. Available at: <https://djvu.online/file/iFGBInt3pLWGL> (accessed: 04.06.2025).
17. Романевич К.В., Мулёв С.Н. Автоматизация классификации сейсмических событий при сейсмомониторинге угольной шахты с использованием машинного обучения. *Горная промышленность*. 2023;(5S):58–64. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-58-64>
Romanevich K.V., Mulev S.N. Automation of seismic events classification during seismic monitoring at a coal mine using machine learning. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):58–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-58-64>

Информация об авторах

Икренников Максим Сергеевич – младший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; аспирант, Высшая школа экономики, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: ikrennikov@yandex.ru

Нефёдов Сергей Игоревич – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; профессор, Высшая школа экономики, г. Москва, Российская Федерация.

Собеневский Андрей Геннадьевич – ведущий инженер, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Вартанов Александр Зараирович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; советник ректора, Высшая школа экономики, г. Москва, Российская Федерация.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.12.2025

Поступила после рецензирования: 09.02.2026

Принята к публикации: 18.09.2026

Information about the authors

Maxim S. Ikrennikov – Junior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Postgraduate Student, HSE University, Moscow, Russian Federation; e-mail: ikrennikov@yandex.ru

Sergey I. Nefedov – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Laboratory, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Professor, HSE University, Moscow, Russian Federation

Andrey G. Sobenevskiy – Leading Engineer, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Alexander Z. Vartanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Advisor to the Rector, HSE University, Moscow, Russian Federation

Article info

Received: 29.12.2025

Revised: 09.02.2026

Accepted: 19.02.2026