

Применение малоапертурной сейсмической антенны для мониторинга продолжительной техногенной вибрации в условиях неоднородных рыхлых грунтов

М.С. Икренников^{1, 2} ✉, С.И. Нефедов^{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: Рассмотрена проблема мониторинга продолжительной техногенной вибрации от горнодобывающих предприятий в условиях неоднородных рыхлых грунтов. Показано, что традиционная оценка риска по пиковой скорости частиц (PPV) не учитывает усталостные эффекты и резонанс, возникающие при длительном низкочастотном воздействии. Обоснована необходимость пространственной селекции источников из-за сложного волноводного распространения поверхностных волн в верхней части разреза. Предложено использование малоапертурной сейсмической антенны (МАСА) радиусом 3 м, размещаемой непосредственно у охраняемого объекта. На основе численного моделирования с реальной записью взрыва и случайным разбросом параметров среды (скорость 100–300 м/с, поглощение 0,3–0,6 дБ/(км·Гц)) разработан алгоритм классификации источников по дальности (признак Q) и определения азимута: амплитудным методом для близких (5–50 м) и фазовым (широкополосным лучеформированием) для дальних (500–2000 м) источников. Показано, что признак Q не перекрывается для двух классов, средняя ошибка определения азимута составляет 2,6° (близкие) и 1,9° (дальние). Методика пригодна для непрерывного автоматического мониторинга.

Ключевые слова: малоапертурная сейсмическая антенна, техногенная вибрация, продолжительное вибрационное воздействие, поверхностные волны, рыхлые грунты, формирование луча

Для цитирования: Икренников М.С., Нефедов С.И. Применение малоапертурной сейсмической антенны для мониторинга продолжительной техногенной вибрации в условиях неоднородных рыхлых грунтов. *Горная промышленность*. 2026;(4):171–177. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-171-177>

Application of a small-aperture seismic aerial in monitoring continuous man-made vibrations in heterogeneous loose soils

M.S. Ikrennikov^{1, 2} ✉, S.I. Nefedov^{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 paper addresses the problem of monitoring continuous man-made vibrations from mining operations in heterogeneous loose soils. It is shown that the conventional risk assessment method based on peak particle velocity (PPV) does not account for fatigue effects and resonance arising from long-term low-frequency exposure. The need for spatial source selection is justified due to the complex waveguide propagation of the surface waves in the upper part of the cross-section. It is proposed to use of a small-aperture seismic aerial (SAS) with a radius of 3 m, placed immediately at the protected facility. Based on numerical simulations with a real blast record and random variations in the medium parameters (velocity 100–300 m/s, attenuation 0.3–0.6 dB/(km·Hz)), an algorithm was developed to classify sources by their range (Q parameter) and determine their azimuth using the amplitude method for the near sources (5–50 m) and the phase method (broadband beamforming) for the distant sources (500–2000 m). It is shown that the Q parameter does not overlap between the two classes; the average azimuth determination error is 2.6° (near) and 1.9° (distant). This method is suitable for continuous automatic monitoring.

Keywords: small-aperture seismic aerial, man-made vibration, continuous vibration exposure, surface waves, loose soils, beamforming

For citation: Ikrennikov M.S., Nefedov S.I. Application of a small-aperture seismic aerial in monitoring continuous man-made vibrations in heterogeneous loose soils. *Russian Mining Industry*. 2026;(4):171–177. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-171-177>

Введение

Вибрационное воздействие горнодобывающих предприятий на прилегающие территории является одним из наиболее значимых факторов техногенного влияния, требующих нормирования и контроля. Традиционные подходы к оценке риска повреждения зданий базируются на измерении пиковой скорости частиц (PPV) при кратковременных воздействиях в первую очередь от взрывных работ. Нормативные документы, в том числе российский ГОСТ Р 52892-2007¹, устанавливают пороговые значения PPV, при превышении которых возможно появление трещин.

Однако накопленные в последние десятилетия эмпирические данные свидетельствуют о том, что продолжительные вибрации даже с амплитудами значительно ниже нормативных порогов могут вызывать не менее серьезные повреждения зданий. Этот эффект объясняется усталостным накоплением деформаций в конструкционных материалах и грунтовом основании, а также резонансными явлениями, которые усиливаются при длительном воздействии.

Особую роль в передаче вибрации от удаленных источников играют низкочастотные поверхностные волны, доминирующие в диапазоне 1–20 Гц. Их распространение в верхней части геологического разреза (ВЧР) подчиняется сложным закономерностям: слоистость, неоднородность упругих свойств, сезонные изменения влажности и температуры, нелинейные эффекты, а также наличие волноводов (аллювиальные долины, лессовые толщи, подземные водоотводы) могут приводить к аномально малому затуханию и фокусировке энергии на удалении в несколько километров.

В этих условиях традиционные методы мониторинга, основанные на одиночных сейсмических станциях, не позволяют достоверно идентифицировать источник вибрации и отделить сигнал от горного предприятия от локальных техногенных помех (транспорт, бытовая техника). В качестве эффективного решения в статье предлагается использование малоапертурной сейсмической антенны (МАСА) – компактной группы сейсмоприемников, размещаемой непосредственно у охраняемого объекта. Методы обработки, разработанные для классических сейсмических массивов (GERESS, NORSAR, Михнево), адаптируются к условиям малой апертуры (3–5 м) и низких скоростей распространения в рыхлых грунтах (100–500 м/с). Благодаря этому МАСА способна:

- определять азимут на источник и оценивать расстояние до него;
- непрерывно регистрировать как импульсные, так и длительные вибрационные воздействия;
- автоматически отбрасывать сигналы от близкорасположенных помеховых источников;
- накапливать статистику превышений, необходимую для оценки кумулятивного риска.

Влияние продолжительности вибрации на образование трещин в зданиях

Современные нормативные документы, как правило, ориентированы на кратковременные (импульсные) воздействия. Например, в ГОСТ Р 52892-2007 приведены ориентировочные предельные значения вибрации, эти значения основаны на зарубежных стандартах (США, Великобритания, Германия). В самом стандарте указывается сложность

таких воздействий и их влияние на разрушение и просадку фундамента, но из-за влияния прочих факторов, в частности связанных с сезонными изменениями, конкретных значений не приводится.

Классическим примером, демонстрирующим опасность длительной вибрации, является исследование американских ученых Cronin & Sverdrup [1], выполненное в сейсмически спокойном регионе верхнего Среднего Запада США. В течение 18 мес после запуска промышленного оборудования (мощная машина на бетонной плите массой 44 т) жители близлежащих домов на расстоянии 750 м наблюдали появление трещин в стенах и фундаментах. Измерения показали, что пиковая скорость частиц в домах составляла всего 0,0147 дюйм/с (0,37 мм/с), сосредоточенная в узком диапазоне 7–10 Гц – почти в 30 раз ниже нормативного порога 0,5 дюйм/с. Вибрации длились до 8 ч, начинаясь и заканчиваясь внезапно, что коррелировало с режимом работы оборудования. Авторы сделали вывод: критическое значение PPV, при котором начинаются деформации, может снижаться с увеличением продолжительности воздействия, особенно если частота вибрации близка к резонансной частоте здания.

Аналогичные эффекты зафиксированы и при мониторинге взрывных работ. Svinkin показал, что низкочастотные вибрации продолжительностью до 17 с способны вызывать трещины в жилых домах даже при PPV ниже нормативов [2]. В работе Roy et al. [3], посвященной взрывам на угольной шахте в Индии, отмечено, что на расстояниях более 5 км высокочастотные компоненты затухают быстрее, а низкочастотные (3–10 Гц) могут распространяться с малым затуханием, и их продолжительность в зданиях увеличивается более чем на 10 с, что создает условия для резонанса.

Влияние длительности подтверждается также исследованиями в сейсмостойком строительстве [4]. Анализ поведения железобетонных каркасных зданий при землетрясениях разной продолжительности показал, что количество циклов нагружения является критическим параметром для накопления усталостных повреждений.

Длительная вибрация воздействует на здание по двум основным механизмам:

1. Усталость материалов. Циклическое нагружение строительных конструкций (кирпичная кладка, бетон, раствор) приводит к накоплению микротрещин и постепенному снижению прочности. Даже при напряжениях, значительно меньших предела прочности, многократное повторение циклов может вызвать разрушение [5].

2. Дополнительная осадка фундамента. Вибрация вызывает уплотнение водонасыщенных песков и лессовых грунтов, что приводит к неравномерной осадке фундамента и, как следствие, к трещинам в стенах [6]. Этот процесс носит накопительный характер и зависит от длительности воздействия.

Таким образом, оценка риска повреждений только по пиковым значениям PPV без учета продолжительности приводит к систематической недооценке опасности.

Распространение поверхностных волн в верхней части разреза: сложности прогнозирования

Основную энергию вибрации от горной техники и взрывов на расстояниях от сотен метров до нескольких километров переносят поверхностные волны Рэлея [7]. Их скорость в приповерхностных рыхлых отложениях составляет

¹ ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. М.: Стандартинформ; 2008. 16 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293834/4293834243.pdf> (дата обращения: 10.03.2026).

100–500 м/с², что значительно ниже скоростей в коренных породах. Длина волны $\lambda = v/f$ при частотах 2–10 Гц лежит в диапазоне от 10 до 250 м:

$$A(r) = A_0 \cdot \frac{1}{r^n} \cdot e^{-\alpha r}, \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда вблизи источника; n – показатель геометрического рассеяния (для поверхностной волны Рэлея в однородной среде $n = 0,5$); α – коэффициент поглощения, зависящий от частоты и свойств среды.

Реальные грунтовые разрезы представляют собой слоистые среды с существенными контрастами упругих свойств. Это приводит к дисперсии поверхностных волн: их фазовая и групповая скорости зависят от частоты [8]. Формируются нормальные моды, которые могут распространяться на большие расстояния с малым затуханием.

При наличии низкоскоростного слоя (например, лесса, аллювия) возникает волновод – колебания «запираются» в этом слое, геометрическое рассеяние уменьшается ($n \rightarrow 0$), и затухание определяется только поглощением $e^{-\alpha r}$. Исследования в бассейне реки Хуанхэ [9] показали, что при мощности лесса 100 м пиковое ускорение на частотах 2–5 Гц в 3,2 раза выше, чем на участках с мощностью 20 м. Аналогичные эффекты описаны для долины реки Ямуна (Дели), где аллювий (отложения водных потоков) мощностью до 500 м создает усиление в 2–4 раза в диапазоне 3–8 Гц [10].

Грунты проявляют нелинейные свойства: при увеличении амплитуды модули сдвига снижаются, а поглощение растет [11]. Кроме того, влажность и температура сильно влияют на скорости волн: сезонное промерзание может увеличивать скорость поперечных волн в 2–3 раза [12]. Это делает невозможным использование единой калибровочной модели для длительного мониторинга.

При совпадении частоты вибрации с собственной частотой здания возникает резонансное усиление колебаний. Коэффициент усиления может достигать 3–7 [13]. При длительном воздействии это многократно увеличивает риск накопления усталостных повреждений.

Совокупность этих факторов приводит к фундаментальному выводу: детерминированное прогнозирование амплитуды вибрации в точке охраняемого объекта по параметрам источника и расстоянию невозможно без использования прямых измерений с пространственной селекцией источников.

Классические сейсмические антенны: методы и допущения

Сейсмические антенны (группы или массивы) широко применяются для регистрации удаленных сейсмических событий: землетрясений, ядерных взрывов, горных ударов. Наиболее известные системы GERESS (Германия), NORSAR (Норвегия), ARCES (Норвегия). Их характерные параметры: апертура 2–3 км, число датчиков 20–25, частотный диапазон 0,1–20 Гц. В России создана малоапертурная сейсмическая группа (МСГ) «Михнево». МСГ состоит из нескольких сейсмоприемников, расположенных на концентрических окружностях радиусами 130, 320 и 600 м [14–18].

Основной метод, позволяющий оценить направление прихода (азимут) и медленность (обратную кажущуюся скорость) волны [19; 20] для сейсмических групп, – f - k анализ. Для набора датчиков с координатами r_i и записями $u_i(t)$ вычисляется матрица спектральной плотности, и мощность сигнала для пробного волнового вектора k определяется как:

$$P(\omega, k) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \langle u_i(\omega) u_j^*(\omega) \rangle e^{ik \cdot (r_i - r_j)}. \quad (2)$$

Пики в плоскости (k_x, k_y) дают оценку медленности $s = |k|/\omega$ и азимута $\theta = \arctan(k_x/k_y)$.

Эквивалентный подход во временной области, применяемый для задачи определения направления прихода волны, называется лучеформирование (beamforming). По данному алгоритму сигналы с датчиков сдвигаются на время $\tau_i = s \cdot r_i$ (где $s = k/\omega$ – вектор медленности) и суммируются. Максимум $E(s)$ соответствует оценке медленности и азимута [14].

Энергия луча:

$$E(s) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j} \int u_i(t) u_j(t + s \cdot (r_j - r_i)) dt. \quad (3)$$

Для автоматической обработки непрерывных записей применяется метод РМСС [18; 20]. Он основан на последовательной корреляции сигналов на парах датчиков; по полученным временным задержкам методом наименьших квадратов оценивается вектор медленности. РМСС устойчив к низкому отношению сигнал/шум и позволяет выделять слабые сигналы.

Для корректной работы перечисленных методов в сейсмических группах необходимо выполнение следующих условий [14; 17; 19–20]:

1. Плоский волновой фронт. Источник должен быть удален настолько, чтобы в пределах апертуры антенны фронт волны можно было считать плоским. Для апертуры 2–3 км и телесеизмических событий (расстояния сотни-тысячи километров) это допущение выполняется.

2. Когерентность сигнала. Сигнал на разных датчиках должен иметь одинаковую форму и различаться только временной задержкой (отсутствие рассеяния внутри антенны). Это обеспечивается при отсутствии сильных локальных неоднородностей и также значительным расстоянием по сравнению с расстоянием до группы.

3. Линейность и стационарность среды. Свойства среды не должны меняться за время обработки, и волны должны подчиняться линейному закону распространения.

4. Известная скоростная модель (или возможность калибровки). Для перевода временных задержек в азимут необходимо знать скорость распространения (или медленность). В классических антеннах часто используют эмпирические поправки (SASC) [17].

5. Достаточная апертура для разрешения по медленности. Разрешающая способность по медленности $\Delta s \approx \lambda/D$. Для классических антенн D составляет километры, что позволяет различать медленности телесеизмических волн (разница $\sim 0,01$ с/км).

6. Кратковременность сигнала. Обработка ведется в окнах длительностью, соответствующей ожидаемой длительности импульсного сигнала (секунды).

МАСА представляет собой компактную группу сейсмиче-

2 ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. М.: Стандартинформ; 2008. 16 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293834/4293834243.pdf> (дата обращения: 10.03.2026); СП 23-105-2004. ОЦЕНКА Вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена. М.: Госстрой России; 2004. 44 с. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294814/4294814554.pdf> (дата обращения: 10.03.2026).

ских датчиков, размещенных по определённой геометрии на площади меньше длины волны [21]. Ее главные отличия от классических антенн: малая апертура, составляющая единицы метров, но работа в диапазоне низких скоростей (100–500 м/с) в рыхлых грунтах позволяет решать задачи фильтрации. Покажем, что при этом выполняются те же допущения, что и для крупных антенн.

Численное моделирование и алгоритм работы малоапертурной сейсмической антенны

В работе исследуется возможность определения азимута и классификации источников вибрации по дальности с помощью малоапертурной сейсмической антенны (МАСА). Антенна состоит из 10 трёхкомпонентных сейсмоприёмников, однако в данной модели используется только вертикальная компонента. Конфигурация антенны: один датчик в центре (0,0) и девять датчиков, равномерно расположенных на окружности радиуса $R = 3$ м. Угловые координаты периферийных датчиков:

$$\phi_i = \frac{2\pi i}{9}, \quad i = 0, 1, \dots, 8. \quad (4)$$

Частота дискретизации сигналов $f_s = 2000$ Гц. В качестве тестового вибрационного сигнала используется реальная запись взрыва (WAV-файл), которая предварительно нормализуется по амплитуде к диапазону $[-1, 1]$ и передискретизируется к частоте f_s .

Рассматривались два класса источников:

- близкие источники – расстояние от центра антенны до источника r выбирается равномерно из интервала $[5, 50]$ м;
- дальние источники – r выбирается равномерно из интервала $[500, 2000]$ м.

Азимут источника θ равномерно распределён на $[0, 2\pi)$. Скорость распространения упругой волны v варьируется равномерно в диапазоне $[100; 300]$ м/с, коэффициент поглощения γ – в диапазоне $[0,3; 0,6]$ дБ/(км·Гц). Доминирующая частота сигнала $f_0 = 5$ Гц используется только для расчёта частотно-зависимого поглощения.

Модель затухания и формирования сигналов на датчиках. Расстояние от источника до n -го датчика с координатами (x_n, y_n) определяется по формуле:

$$r_n = \sqrt{r^2 + \rho_n^2 - 2r\rho_n \cos(\theta - \phi_n)}, \quad (5)$$

где $\rho_n = 0$ для центрального датчика ($n = 0$) и $\rho_n = R$ для периферийных ($n = 1, \dots, 9$). Амплитуда сигнала на датчике рассчитывается с учётом цилиндрического геометрического рассеяния и экспоненциального поглощения:

$$A(r_n) = \frac{1}{\sqrt{r_n}} \cdot 10^{-\frac{\gamma f_0 r_n}{20 \cdot 1000}}. \quad (6)$$

Временная задержка сигнала на n -м датчике относительно момента излучения составляет $\tau_n = r_n/v$. Исходный сигнал взрыва $S(t)$ дискретизован с шагом $\Delta t = 1/f_s$. Для получения сигнала на датчике выполняется циклический сдвиг массива отсчётов на величину $\Delta k_n = \text{round}(\tau_n f_s)$ с последующим обнулением отсчётов, оказавшихся в начале (для имитации причинности). Затем сдвинутая копия умножается на амплитуду $A(r_n)$. Таким образом, сигнал на n -м датчике:

$$s_n[k] = A(r_n) \cdot S[k - \Delta k_n], \quad k = 0, \dots, N_s - 1, \quad (7)$$

где N_s – число отсчётов в записи.

Предварительная обработка: детектирование вступления сигнала. Поскольку в реальной записи присутствует предшествующий шум, необходимо определить момент прихода сигнала. Для центрального датчика вычисляется огибающая с помощью преобразования Гильберта:

$$E_0(t) = |\mathcal{H}[s_0(t)]|. \quad (8)$$

По первым 0,1 с (200 отсчётов) оцениваются среднее μ_{noise} и стандартное отклонение σ_{noise} огибающей. Порог обнаружения:

$$T_{\text{onset}} = \mu_{\text{noise}} + 5\sigma_{\text{noise}}. \quad (9)$$

Момент вступления tonset определяется как первый отсчёт, для которого $E_0(t) > T_{\text{onset}}$. Если такой отсчёт не найден, tonset принимается равным 0,1 с. Все последующие вычисления используют только часть сигнала, начиная с t_{onset} .

Выравнивание сигналов для близких источников.

Для близких источников разница расстояний до датчиков приводит к заметным временным сдвигам, которые необходимо компенсировать перед сравнением энергий. Выравнивание выполняется с помощью корреляции огибающих.

Для каждого периферийного датчика i ($i = 1, \dots, 9$) вычисляется огибающая $E_i(t)$. В окне длительностью $W_{\text{corr}} = 0,6$ с (1200 отсчётов), начинающемся с t_{onset} , вычисляется взаимная корреляция:

$$C_i(\tau) = \int_{t_{\text{onset}}}^{t_{\text{onset}} + W_{\text{corr}}} E_0(t) E_i(t + \tau) dt. \quad (10)$$

Положение максимума $\tau_i = \arg\max C_i(\tau)$ определяет временную задержку. В дискретной реализации задержка округляется до целого числа отсчётов: $\Delta k_i = \text{round}(\tau_i f_s)$. Этот сдвиг используется для совмещения сигналов.

Вычисление отношения энергий Q (классификационный признак). Для центрального датчика находится индекс глобального максимума модуля сигнала после вступления. Далее для каждого датчика выделяется окно длительностью $W_{\text{RMS}} = 0,25$ с (500 отсчётов), центрированное относительно k_{max} для центрального датчика и сдвинутое на Δk_i для периферийных. В этом окне вычисляется взвешенная энергия с экспоненциальным весом. Весовая функция:

$$w[m] = \frac{e^{-\alpha m / f_s}}{\langle e^{-\alpha m / f_s} \rangle}, \quad m = 0, \dots, W_{\text{RMS}} f_s - 1, \quad (11)$$

где $\alpha = 10^{-1}$ – параметр затухания, а $\langle \cdot \rangle$ – среднее арифметическое по длине окна, введённое для сохранения масштаба (сумма весов равна длине окна). Взвешенная энергия для центрального датчика:

$$E_0 = \sum_{m=0}^{M-1} w[m] \cdot s_0^2[k_{\text{max}} - M/2 + m], \quad (12)$$

где $M = W_{\text{RMS}} f_s$. Для периферийного датчика аналогично, но с учётом сдвига:

$$E_i = \sum_{m=0}^{M-1} w[m] \cdot s_i^2[k_{\text{max}} + \Delta k_i - M/2 + m]. \quad (13)$$

Отношение энергий для каждого периферийного датчика:

$$Q_i = \frac{E_i}{E_0}. \quad (14)$$

Итоговое значение $Q = \max_i =_{1..9} Q_i$ служит признаком для классификации источника по дальности. В силу того что для близких источников периферийный датчик может оказаться значительно ближе к источнику, чем центральный, Q заметно превышает 1. Для дальних источников разница расстояний пренебрежимо мала, и Q близко к 1.

Амплитудный метод для близких источников. После выравнивания для каждого периферийного датчика в том же окне W_{RMS} вычисляется среднеквадратичное значение (RMS) – без взвешивания, для устойчивости:

$$\text{RMS}_i = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} s_i^2[k_{\text{max}} + \Delta k_i - M/2 + m]}. \quad (15)$$

Находится индекс датчика с максимальным RMS: $i_{\text{max}} = \arg \max_i \text{RMS}_i$. Поскольку датчики расположены дискретно через 40° , для повышения точности применяется параболическая интерполяция по трём точкам: $(i_{\text{max}} - 1, \text{RMS}_{i_{\text{max}} - 1})$, $(i_{\text{max}}, \text{RMS}_{i_{\text{max}}})$, $(i_{\text{max}} + 1, \text{RMS}_{i_{\text{max}} + 1})$. Координата вершины параболы i^* вычисляется по формуле:

$$i^* = i_{\text{max}} + \frac{\text{RMS}_{i_{\text{max}} - 1} - \text{RMS}_{i_{\text{max}} + 1}}{2(\text{RMS}_{i_{\text{max}} - 1} - 2\text{RMS}_{i_{\text{max}}} + \text{RMS}_{i_{\text{max}} + 1})}. \quad (16)$$

Оценка азимута:

$$\theta_{\text{est}} = \phi_{i_{\text{max}}} + (i^* - i_{\text{max}}) \cdot \frac{2\pi}{9}, \quad (17)$$

с последующим приведением к диапазону $[0, 360^\circ)$.

Фазовый метод (широкополосное лучеформирование) для дальних источников. Для дальних источников амплитудный метод теряет эффективность из-за близости Q к 1, но сохраняется разность фаз, обусловленная временными задержками. Используется предположение о плоской волне. Временная задержка на датчике с координатами (x_n, y_n) относительно центра для направления θ равна:

$$\tau_n(\theta) = \frac{x_n \cos \theta + y_n \sin \theta}{v}. \quad (18)$$

где $v_{\text{est}} = 200$ м/с – фиксированная оценочная скорость (среднее значение диапазона). Использование постоянной скорости допустимо, так как для плоской волны оценка азимута по максимуму когерентности не зависит от масштаба задержек (ошибка в v лишь снижает амплитуду луча, но не смещает его максимум).

Для обработки выбирается окно длительностью $W_{\text{RMS}} = 0,25$ с, начинающееся в точке глобального максимума центрального датчика k_{max} . Для каждого пробного направления θ_j (шаг 1° , всего 360 направлений) вычисляется сумма сдвинутых сигналов:

$$S_{\theta_j}[k] = \sum_{n=0}^9 s_n[k - \text{round}(\tau_n(\theta_j) f_s)]. \quad (19)$$

Энергия луча:

$$P(\theta_j) = \sum_k S_{\theta_j}^2[k]. \quad (20)$$

Направление, дающее максимум $P(\theta_j)$, принимается за грубую оценку азимута. Для увеличения точности применяется параболическая интерполяция по трём точкам в окрестности максимума.

Статистическая оценка качества модели на сигналах при разбросе параметров и различных положениях источника в пространстве

Для тестового сигнала использовалась реальная запись сейсмического взрыва, параметры сигнала выбирались случайными по описанной выше системе. Было произведено по 5000 реализаций каждого класса:

- близкие источники (5–50 м): $Q \in [1,18; 2,72]$, среднее 1,41, стандартное отклонение 0,26;
- дальние источники (500–2000 м): $Q \in [1; 1,16]$, среднее 1,01, стандартное отклонение 0,03.

Точность определения азимута:

- близкие источники (амплитудный метод с параболической интерполяцией): средняя ошибка $2,6^\circ$, максимальная ошибка $19,4^\circ$, стандартное отклонение $4,4^\circ$;
- дальние источники (широкополосное лучеформирование): средняя ошибка $1,9^\circ$, максимальная ошибка $7,5^\circ$, стандартное отклонение $1,6^\circ$.

Ближний диапазон также был разделён на поддиапазоны, в каждом из которых по 300 эвентам собиралась статистика и проводился детальный анализ характеристик.

Таблица 1

Детальный анализ для близких источников по поддиапазнам

Table 1

A detailed analysis for near sources by subbands

Диапазон, м	Средняя ошибка, °	Медиана, °	95-й перцентиль, °	Максимум, °
5–10	3,78	1,88	16,21	19,70
10–20	3,13	1,00	17,02	19,84
20–30	2,92	0,75	16,72	19,93
30–40	2,03	0,43	12,17	19,49
40–50	2,56	0,29	16,11	28,58

Наименьшая средняя ошибка наблюдается в диапазоне 30–40 м ($2,03^\circ$), наибольшая – в диапазоне 5–10 м ($3,78^\circ$). Максимальная ошибка $28,58^\circ$ зафиксирована в диапазоне 40–50 м, что связано с приближением отношения расстояний к единице и повышенной чувствительностью к шуму.

Таблица 2

Ошибки определения азимута при использовании модельного сигнала с шумом и параболической интерполяции

Table 2

The azimuth determination errors when using a model signal with noise and parabolic interpolation

Метод	Средняя ошибка, °	Максимальная ошибка, °	Стандартное отклонение, °
Ближние (амплитудный + интерполяция)	2,99	25,18	4,59
Дальние (фазовый + интерполяция)	0,07	0,62	0,06

Для второго теста ради сравнения использовался модельный сигнал в виде гармоникой частотой 5 Гц и добавлением шума на уровне 2% от максимального значения сигнала на центральном датчике. Результаты приведены в табл. 2.

Обсуждение результатов

Эффективность классификации по Q . Отсутствие перекрытия диапазонов Q для близких и дальних источников свидетельствует о том, что предложенный признак является практически идеальным источником дальних и ближних источников.

Точность азимута для близких источников. Амплитудный метод с выравниванием по огибающей и параболической интерполяцией обеспечивает среднюю ошибку около $2,6^\circ$. Ухудшение точности на малых расстояниях (5–10 м) объясняется тем, что при g , близком к радиусу антенны (3 м), градиент амплитуды становится очень крутым и небольшие погрешности в выравнивании приводят к заметным ошибкам. На больших расстояниях (40–50 м) разница амплитуд уменьшается, что также повышает чувствительность к шуму. Тем не менее медианная ошибка во всех диапазонах не превышает $1,9^\circ$, а 95% ошибок лежат в пределах $12\text{--}17^\circ$, что приемлемо для практических задач.

Точность азимута для дальних источников. Широкополосное лучеформирование с фиксированной оценочной скоростью 200 м/с даёт среднюю ошибку $1,9^\circ$, что несколько выше субградусной точности, полученной на синтетических гармонических сигналах ($0,07^\circ$). Это связано со сложной формой реального сигнала взрыва (широкий спектр, нестационарность). Тем не менее точность остаётся высокой (95% ошибок $< 5,3^\circ$), что позволяет уверенно определять направление на удалённый источник.

Практическая значимость. Предложенная методика может быть непосредственно применена в системах мониторинга вибрационного воздействия горных предприятий. Малоапертурная антенна (радиус 3 м) компактна и может быть размещена вблизи охраняемых объектов. Алгоритм работает в реальном времени. Классификация по Q не требует калибровки и устойчива к вариациям параметров среды.

Заключение

В результате выполненной работы получены следующие основные результаты.

На основе анализа литературных данных подтверждено,

что продолжительные низкочастотные вибрации (1–20 Гц) с амплитудами ниже нормативных порогов PPV способны вызывать повреждения зданий за счёт усталости материалов и дополнительной осадки фундаментов. Существующие нормативы, ориентированные на импульсные воздействия, систематически недооценивают кумулятивный риск.

Показано, что в неоднородных рыхлых грунтах распространение поверхностных волн подчиняется сложным закономерностям (дисперсия, волноводные эффекты, нелинейность, сезонные изменения), что делает детерминированное прогнозирование амплитуды вибрации без прямых измерений с пространственной селекцией невозможным.

Обоснована применимость малоапертурной сейсмической антенны (радиус 3 м) для условий низких скоростей (100–300 м/с). Установлено, что при такой апертуре выполняются допущения плоского волнового фронта и когерентности сигнала для удалённых источников, а для близких – сохраняется заметный градиент амплитуд.

Разработан и численно опробован алгоритм обработки, включающий:

- детектирование вступления сигнала по огибающей;
- выравнивание сигналов для близких источников с помощью корреляции;
- вычисление классификационного признака Q (отношение взвешенных энергий периферийного и центрального датчиков);
- оценку азимута амплитудным методом (близкие источники) или широкополосным лучеформированием (дальние источники).

На 5000 реализаций со случайными параметрами источника и среды получено:

- для близких источников (5–50 м) $Q \in [1,18; 2,72]$, средняя ошибка азимута $2,6^\circ$;
- для дальних источников (500–2000 м) $Q \in [1,00; 1,16]$, средняя ошибка азимута $1,9^\circ$.

Перекрытие по Q отсутствует, что обеспечивает надёжную классификацию без калибровки.

Предложенная методика может быть непосредственно реализована в системах непрерывного мониторинга вибрационного воздействия горных предприятий на прилегающие территории. Компактность антенны и устойчивость к вариациям параметров среды позволяют размещать её вблизи охраняемых объектов и автоматически накапливать статистику для оценки кумулятивного риска.

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: 27.03.2026).
2. Svinkin M.R. Minimizing construction vibration effects. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2004;9(2):108–115. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2004\)9:2\(108\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2004)9:2(108))
3. Roy M.P., Sirveiya A.K., Singh P.K. Low frequency long duration blast vibrations and their effect on residential structures. In: *Proceedings of the 31st Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Orlando, February 6–9, 2005*. Orlando, FL; 2005. OSTI ID: 20674572. Available at: <https://www.osti.gov/biblio/20674572> (accessed: 27.03.2026).
4. Bommer J.J., Martinez-Pereira A. The prediction of strong-motion duration for engineering design. In: *Proceeding's 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, 24–29 June 1996*. Elsevier; 1996. Paper No. 84. Available at: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_84.PDF (accessed: 27.03.2026).
5. Stephens J.E., Yao J.T.P. Damage assessment using response measurements. *Journal of Structural Engineering*. 1987;113(4):787–801. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1987\)113:4\(787\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:4(787))

6. Kramer S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall; 1996. 653 p.
7. Левшин А.Л. *Поверхностные и каналовые сейсмические волны*. М.: Наука; 1973. 176 с.
8. Brekhovskikh L.M., Godin O.A. *Acoustics of Layered Media I: Plane and Quasi-Plane Waves*. Berlin: Springer, 1990. 240 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-52369-4>
9. Wang H.J., Zhang J.H., Wang P. Amplification of thickness and stratigraphy of loess deposit on seismic ground motion in the Yellow River Basin. *Earthquake Science*. 2026;39(1):32–50. <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2025.11.006>
10. Kumar L., Narayan J.P. Computation of ground motion amplification scenario in NCT Delhi for earthquake engineering purposes and seismic microzonation. *Pure and Applied Geophysics*. 2020;177(8):3797–3829. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02420-4>
11. Pavlenko O.V. Nonlinear seismic effects in soils: numerical simulation and study. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2001;91(2):381–396. Available at: <http://pavlenko.ifz.ru/papers/Ssa00047.pdf> (accessed: 27.03.2026).
12. Ahmadi A.B., Morozov I. Separation of geometric spreading, scattering and intrinsic attenuation in VSP data. In: *GeoConvention 2013, Calgary, May 6–10, 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: 27.03.2026).
13. Kramer S.L., Stewart J.P. *Geotechnical Earthquake Engineering*. 2nd ed. CRC Press; 2024. 1060 p. <https://doi.org/10.1201/9781003512011>
14. 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)
15. 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>
16. Kværna T., Gibbons S.J., Näsholm S.P. CTBT seismic monitoring using coherent and incoherent array processing. *Journal of Seismology*. 2021;25:1189–1207. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10026-z>
17. Gibbons S.J., Kværna T., Ringdal F. Considerations in phase estimation and event location using small-aperture regional seismic arrays. *Pure and Applied Geophysics*. 2010;167(4-5):381–399. <https://doi.org/10.1007/s00024-009-0024-1>
18. 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>
19. 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>
20. 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>
21. Икренников М.С., Неведов 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>
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. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-97-102>

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; <https://orcid.org/0000-0002-7734-7868>; e-mail: ikrennikov@yandex.ru

Нефедов 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.

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; <https://orcid.org/0000-0002-7734-7868>; 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

Article info

Received: 06.03.2026

Revised: 12.05.2026

Accepted: 01.06.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 06.03.2026

Поступила после рецензирования: 12.05.2026

Принята к публикации: 01.06.2026