



## СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-11-1058>

УДК 622.831.322

**Измерение коэффициента затухания акустического излучения от работающего проходческого комбайна в угольной шахте**А. В. Шадрин   Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (ФИЦ УУХ СО РАН),  
г. Кемерово, Российская Федерация [avsh-357@mail.ru](mailto:avsh-357@mail.ru)**Аннотация**

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения достоверности прогноза геогазодинамических явлений в угольных шахтах акустическими методами путем их совершенствования. Для этого необходимы методы определения основных параметров, определяющих распространение акустических волн по углепородному массиву. К их числу относится коэффициент затухания звука. Цель: обосновать алгоритм измерения в шахтных условиях коэффициента затухания акустического излучения в диапазоне частот, используемом для прогноза ГДЯ. Для достижения указанной цели на одной из шахт Кузбасса с помощью многоканальной аппаратуры Микон-ГЕО регистрировался спектр «шума» работающего проходческого комбайна сейсмоприемниками, установленными на расстоянии соответственно 11; 21; 31; 47,7; 57,7 и 67,7 м от забоя выработки. Установлено, что благодаря интерференции продольной и поперечной волн и их отражений от границ раздела угольного пласта и вмещающих пород зависимость коэффициента затухания звука линейчатого спектра с окном суммирования гармоник в 20 Гц не возрастает линейно с частотой, как это имеет место в однородном твердом теле безграничных размеров, а приобретает немонотонный характер. Это приводит к погрешности оценки напряженного состояния массива методами, основанными на спектральном анализе шума работающего горного оборудования. Для устранения указанного недостатка предложено определять коэффициент затухания в частотных окнах, соответствующих одной гармонике, равных не менее чем 200 Гц. Причем время усреднения амплитуд спектральных составляющих предложено брать равным интервалу между циклами остановки комбайна для крепления бортов выработки. Для условий эксперимента это позволило получить линейный характер возрастания коэффициента затухания звука в экстраполированном диапазоне частот 0–700 Гц с коэффициентом детерминации 0,997.

**Ключевые слова**

геогазодинамические явления, текущий прогноз, критерий опасности, акустическое излучение, алгоритм определения, коэффициент затухания, интерференция волн, спектральный анализ, временное окно, частотное окно

**Финансирование**

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2026-0002 «Разработка методов комбинированного применения геофизических систем прогноза, контроля и управления состоянием горного массива, а также технологий предотвращения газодинамических явлений и мониторинга проведенных мероприятий по их реализации» (рег. № 1023032200092-2-1.5.1;2.7.5).

**Для цитирования**

Shadrin A.V. Measurement of the attenuation coefficient of acoustic signals generated by an operating roadheader in a coal mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026;11(2):169–179. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-11-1058>



## MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

**Measurement of the attenuation coefficient of acoustic signals generated by an operating roadheader in a coal mine**A. V. Shadrin   

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FRC CCC SB RAS),  
Kemerovo, Russian Federation

 [avsh-357@mail.ru](mailto:avsh-357@mail.ru)**Abstract**

This study is motivated by the need to improve the reliability of predictions of gasogeodynamic phenomena (GGP) in coal mines by refining acoustic prediction methods. This requires methods for determining the key parameters governing acoustic-wave propagation through the coal-rock mass, including the acoustic attenuation coefficient. The objective was to justify an algorithm for measuring the acoustic attenuation coefficient under mine conditions over the frequency range used for GGP prediction. To this end, the noise spectrum generated by an operating roadheader was recorded at a Kuzbass mine using the multichannel Mikon-GEO system and geophones installed 11, 21, 31, 47.7, 57.7, and 67.7 m from the roadway face. The results showed that, owing to interference among longitudinal and shear waves and waves reflected from the coal seam-host rock interfaces, the attenuation coefficient calculated from a line spectrum by summing harmonic amplitudes within 20-Hz frequency windows did not increase linearly with frequency, as expected for an unbounded homogeneous solid, but instead varied nonmonotonically. This introduces errors into rock-mass stress estimates obtained using methods based on spectral analysis of noise generated by operating mining equipment. To eliminate this source of error, it was proposed that the attenuation coefficient be determined after summing the harmonic amplitudes within frequency windows at least 200 Hz wide. It was also proposed that the averaging time for the amplitudes of the spectral components correspond to the roadheader operating interval between successive stoppages for roadway support installation. Under the experimental conditions, this approach produced a linear increase in the acoustic attenuation coefficient over the extrapolated frequency range of 0–700 Hz, with a coefficient of determination of 0.997.

**Keywords**

gasogeodynamic phenomena, operational prediction, hazard criterion, acoustic signals, attenuation coefficient determination algorithm, attenuation coefficient, wave interference, spectral analysis, time window, frequency window

**Funding**

This work was carried out under the State Assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2026-0002, “Development of methods for the combined use of geophysical systems to predict, monitor, and control the state of the rock mass, as well as technologies for preventing gas-dynamic phenomena and monitoring the measures undertaken to implement these technologies” (registration No. 1023032200092-2-1.5.1;2.7.5).

**For citation**

Shadrin A. V. Measurement of the attenuation coefficient of acoustic signals generated by an operating roadheader in a coal mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026;11(2):169–179. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-11-1058>

**Введение**

Акустические методы широко применяются в горном деле для изучения строения и свойств горного массива, мониторинга различных технологических процессов и оценки уровня безопасности в условиях проявления различных влияющих факторов [1–3]. Среди них особую группу составляют методы текущего прогноза геогазодинамических явлений (ГДЯ). Эта группа, в свою очередь, включает две основные подгруппы. Первая основана на регистрации акустической эмиссии из призабойного пространства проводимых выработок [4–6]. Вторая использует спектральный анализ акустических сигналов, генерируемых

либо работающим горным оборудованием, либо ударным механизмом [7–9]. В качестве последнего используется либо кувалда или молоток<sup>1</sup>, либо специальное устройство, в котором реализуется падение металлического груза известной массы с определенной (постоянной) высоты [10].

<sup>1</sup> Руководство. Методика выполнения акустических зондирований горного массива с применением программно-аппаратного комплекса. М.: Межотраслевая научно-техническая лаборатория по разработке, изготовлению и внедрению автоматизированных систем в горной промышленности (МНТЛ РИВАС); 2016. 36 с.



Основными параметрами акустических методов исследования, используемых для регионального, локального и текущего прогноза ГДЯ, являются частота колебаний, их энергия, скорость распространения волн и их затухание в контролируемой среде. Поэтому для компьютерного моделирования распространения акустических волн с целью совершенствования методов прогноза ГДЯ необходимо знать эти параметры. Однако они, помимо характеристик источника звука, существенно зависят от строения, состава и физико-механических свойств, напряженного состояния в конкретной области массива горных пород. Эти факторы определяют закономерности возникновения, распространения и затухания акустических волн. Следовательно, необходимы оперативные методы экспериментального определения этих параметров.

Важным параметром акустического излучения является диапазон рабочих частот. Он определяет, с одной стороны, разрешение метода при контроле структуры массива: чем выше частота, тем нарушения меньших размеров могут быть идентифицированы. С другой стороны, частотный диапазон определяет коэффициент затухания звука и, следовательно, радиус чувствительности метода контроля. Чем выше частота, тем больше величина коэффициента затухания звука и меньше радиус чувствительности метода. Так, например, регистрация землетрясений на больших удалениях от регистраторов осуществляется на инфранизких частотах (0,001–16 Гц), а горных ударов в пределах шахтного поля – в диапазоне от единиц до нескольких сотен герц [11, 12]. Текущий прогноз ГДЯ методом «по параметрам искусственного акустического сигнала» в горных выработках угольных шахт использует частотный диапазон от единиц герц до 5 кГц (при использовании для регистрации сигнала пьезопреобразователя) [7–9]. Хотя из-за большого затухания сигнала на высоких частотах и рабочих характеристик применяемых приемных преобразователей звука реальный диапазон не превышает 1,5–2,0 кГц. Таким образом, коэффициент затухания звука зависит от применяемого типа регистратора акустического излучения, структуры горного массива, его прочностных свойств и напряженного состояния на конкретном участке углепородного массива.

Цель данной работы – обосновать алгоритм измерения в шахтных условиях коэффициента затухания акустического излучения в диапазоне частот, используемом для прогноза ГДЯ.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Установить факторы и параметры, определяющие коэффициент затухания акустического излучения от работающего проходческого комбайна в углепородном массиве.

2. Экспериментально синхронно зарегистрировать несколькими датчиками, установленными на разном расстоянии от забоя подготовительной выработки, временную зависимость акустического излучения от рабочего органа проходческого комбайна.

3. По полученным данным определить спектральный состав зарегистрированного излучения.

4. Проанализировать полученный результат и предложить алгоритм определения эффективного коэффициента затухания «шума» работающего проходческого комбайна.

### **Параметры и факторы, определяющие затухание акустического излучения в горном массиве**

Источники звука, контролируемые указанными акустическими методами прогноза ГДЯ: скачкообразно растущие трещины и «шум» работающего «по углю или породе» горного оборудования – излучают продольные и поперечные волны в широком диапазоне частот. Они различаются скоростью распространения и коэффициентом затухания, сильно зависящими от физико-механических свойств, термодинамического состояния и структурных особенностей массива [11–13]. При этом в различных источниках отмечается, что скорость продольных волн в 1,5–2,5 [14] или в 1,7–1,9 [15] раз выше скорости поперечной, а коэффициент затухания в твердом теле и горном массиве приблизительно прямо пропорционален частоте [15–17] и обратно пропорционален напряжениям в массиве [18]. Причем коэффициент затухания поперечной волны обычно меньше, чем продольной [19]. Так, например, экспериментально установлено, что «амплитуда поперечной волны в направлении оси главного максимума ее диаграммы направленности, как правило, в 1,5–2 раза больше амплитуды продольной волны в том же направлении» [14].

На принятый сейсмоприемниками акустический сигнал от регистрируемого источника оказывает влияние большое число различных факторов, к числу которых относится слоистая структура массива, наличие в нем нарушений и различных неоднородностей, напряженное состояние, технологические параметры ведения горных работ, наличие одновременно работающих иных акустических источников и другие [20–22].

Слоистая структура углепородного массива обуславливает то, что угольный пласт является подобием волновода. Это приводит к концентрации преобладающей части излученной источником энергии в этом пласте, а не во вмещающих породах, если источник звука также находится в угольном пласте. В результате интерференции продольной и поперечной волн, их отражений от границ раздела слоев с различными акустическими импедансами и возможностью трансформации в другие типы волн в угольном пласте формируется каналовая волна [1].

Волноводный характер угольного пласта приводит и к отфильтровыванию из всего спектра излученного сигнала гармоник с наименьшим затуханием. При этом мощность пласта определяет преимущественную область регистрируемых частот, т.к. она кратна целому числу полуволн с наименьшим затуханием. Поэтому с увеличением мощности пласта спектр отфильтрованных массивом гармоник смещается в область низких частот и наоборот: с уменьшением мощности пласта отфильтрованные гармоники смещаются в область более высоких частот.



Но реальные источники акустических сигналов имеют достаточно широкую диаграмму направленности. Поэтому часть излучения преломляется на границах раздела угольного пласта и вмещающих пород. Далее эти волны отражаются от границ раздела слоев с различными акустическими импедансами или различного рода неоднородностей и возвращаются в угольный пласт. Поскольку геометрический путь этих волн больше, чем продольной и поперечной, они отстают от них во времени. Это заметно при импульсном источнике сигнала. В частности, в хвостовой части сейсмических сигналов от мощных импульсных источников типа землетрясения эти дополнительные колебания называются кода-волнами [23].

При непрерывном источнике излучения и на небольших расстояниях от источника различить поперечную и продольную волны и кода-волны невозможно. Однако их гармоники интерферируют друг с другом, образуя результирующее излучение.

Поскольку результирующее излучение есть результат интерференции указанных типов волн, ослабление сигнала оценивают эффективным коэффициентом затухания [1].

Затухание звука при распространении в горном массиве обусловлено преимущественно поглощением энергии благодаря внутреннему трению и рассеянию энергии на неоднородностях среды, а также расхождением волны в соответствии с диаграммой направленности источника [19]. С учетом этих факторов амплитуду сигнала на удалении от источника можно описать как в зависимости от времени  $t$  распространения до приемника, так и от расстояния  $r$  между источником и приемником. В первом случае амплитуду результирующей сейсмической волны  $A(f, t)$  для частоты  $f$  и времени  $t$  можно описать следующим выражением [11]:

$$A(f, t) = S(f, t) \cdot t^{-\gamma} \cdot \exp\left[\frac{-\pi f t}{Q(f)}\right], \quad (1)$$

где  $S(f, t)$  – временная функция источника на частоте  $f$  в момент времени  $t$ ;  $\gamma$  – безразмерный параметр, характеризующий геометрическое расхождение волны и равный 1,0; 0,5 или 0,75 соответственно для объемных, поверхностных или диффузных волн [11];  $Q(f)$  – эффективная сейсмическая добротность. Здесь функция  $t^{-\gamma}$  определяется диаграммой направленности источника и характеризует расхождение со временем энергии излучения в пространстве. Добротность колебаний на фиксированной гармонике характеризует относительную убыль энергии волны из-за внутреннего трения в интервал времени, равный одному периоду колебаний. (С уменьшением относительных потерь энергии добротность возрастает). Эффективная сейсмическая добротность характеризует этот процесс для всего волнового пакета.

Во втором случае амплитуду результирующей волны  $A(f, r)$  на расстоянии  $r$  от источника можно записать в виде [19]:

$$A(f, r) = A_0(f) \cdot R(r) \cdot \exp[-\alpha_{\text{эф}}(f) \cdot r], \quad (2)$$

где  $A_0(f)$  – амплитуда результирующей волны у источника излучения;  $R(r)$  – функция расхождения волны;

$\alpha_{\text{эф}}(f)$  – эффективный коэффициент затухания результирующей в результате интерференции волны.

Выражения в квадратных скобках формул (1) и (2) характеризуют одинаковое затухание для обеих форм записи амплитуды результирующей волны. Поэтому их можно приравнять. Тогда если в показателе экспоненты в выражении (1) ввести замену  $t = r/V$ , где  $V$  – эффективная скорость результирующей волны, из равенства выражений в скобках получим следующую связь эффективного коэффициента затухания с эффективной сейсмической добротностью:

$$\alpha_{\text{эф}}(f) = \frac{\pi f}{QV}. \quad (3)$$

При моделировании процесса затухания акустической волны с расстоянием необходимо знать функцию  $R(r)$ . Для источника звука малой площади излучения на поверхности горной выработки диаграмму направленности низкочастотных колебаний можно приближенно принять сферической, т.е. звук распространяется практически во всех направлениях. Для нее функция расхождения  $R(r) = 1/r$  [19]. На высоких частотах функция расхождения более соответствует плоской волне [14]. Для нее  $R(r) \approx 1$  [19]. Поскольку результирующая волна от скачкообразно растущей трещины или работающего горного оборудования содержит широкий спектр частот, реальное выражение функции расхождения можно представить в виде:

$$R(r) = r^{-n}, \quad (4)$$

где  $0 < n < 1$ .

По результатам экспериментальных исследований в работах [1, 24] принято цилиндрическое расхождение волны с расстоянием, для которого  $R(r) = 1/\sqrt{r}$ . Но в этих работах анализируются преимущественно ультразвуковые колебания. Можно предположить, что в области частот 0–1,5 кГц рабочий орган комбайна или буровой штанги излучает волну, диаграмма направленности которой в зависимости от частоты гармоник имеет промежуточное значение между сферической и цилиндрической.

Из выражений (1) и (2) видно, что амплитуда результирующей волны при удалении от источника монотонно убывает. Однако экспериментальные данные, приведенные в ряде работ, свидетельствуют о нарушении этой закономерности. При ультразвуковом зондировании массива это проявляется особенно на небольшом удалении приемника звука от источника [14]. Немонотонность изменения амплитуды волны с расстоянием должна приводить к аналогичному изменению эффективного коэффициента затухания с расстоянием. Покажем это по результатам экспериментальных исследований в диапазоне частот, используемых для текущего прогноза ГДЯ методом «по параметрам искусственного акустического сигнала».

### Экспериментальное определение коэффициента затухания

При прогнозе ГДЯ на одной из шахт Кузбасса методом «по параметрам искусственного акустического сигнала» немонотонность изменения ампли-

туды «шума» работающего проходческого комбайна экспериментально зарегистрирована на удалении 11–67,7 м. Здесь регистрация «шума» комбайна осуществлялась аппаратно-программным комплексом Микон-ГЕО с шестью сейсмоприемниками (СМП), установленными на расстоянии 11; 21; 31; 47,7; 57,7 и 67,7 м от забоя выработки. Условия эксперимента изложены в работе [25].

Было установлено, что амплитуда сигнала с 6-го (самого удаленного) СМП соизмерима с уровнем акустических помех, зарегистрированных при неработающем комбайне. Поэтому сигналы с этого СМП в дальнейшем не анализировались. Исходные (до усреднения гармоник в частотных и временных окнах) спектры сигналов с пяти остальных СМП, полученные после быстрого Фурье-преобразования с разрешением в 1 Гц и усреднением амплитуд соответствующих гармоник по времени в окнах продолжительностью в 1 мин, приведены на рис. 1.

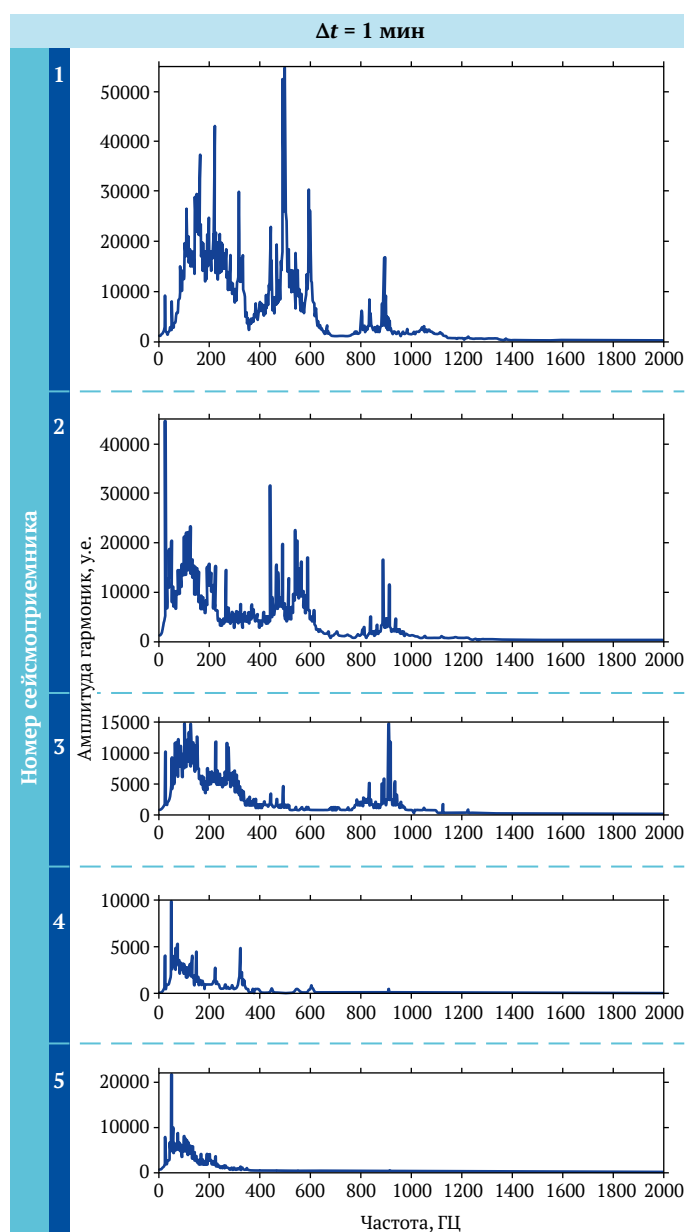


Рис. 1. Исходные спектры сигналов с СМП №№ 1–5

Приведенные данные свидетельствуют также, что при указанных условиях эксперимента амплитуда сигнала на частотах свыше 1200 Гц соизмерима с уровнем шумов, зарегистрированных при неработающем комбайне. Поэтому в дальнейшем ограничались анализом спектра в диапазоне 1–1200 Гц.

Из рисунка видно, что, например, в области низких частот 0–100 Гц амплитуда гармоник с более удаленного от источника СМП № 2 больше, чем с менее удаленного СМП № 1, а с СМП № 5 превышает амплитуды гармоник с СМП № 3 и № 4. С увеличением частоты и уменьшением амплитуд гармоник со всех СМП эта немонотонность уменьшения амплитуды с увеличением  $r$  становится менее заметной.

При использовании зависимости результирующей волны  $A(f, r)$  от расстояния  $r$  в виде (2) эффективный коэффициент затухания рассчитывается по формуле [1]:

$$\alpha_{i1} = \frac{\ln\left(\frac{A_i}{A_1}\right)}{r_{i1}}, \quad i \in [2; 5], \quad (5)$$

где  $\alpha_{i1}$  – эффективный коэффициент затухания на участке между 1-м и  $i$ -м СМП,  $\text{м}^{-1}$ ;  $A_1$  и  $A_i$  – соответственно амплитуды гармоник на 1-м и  $i$ -м СМП, у.е.;  $r_{i1}$  – расстояние между  $i$ -м и 1-м СМП, м.

Если определять коэффициент затухания по спектру, приведенному на рис. 1, то в области частот, на которых сигнал с более удаленного СМП больше по амплитуде, чем с менее удаленного, его величина окажется отрицательной, что противоречит физическому смыслу затухания сигнала. Для исключения этого парадоксального эффекта применили усреднение амплитуд гармоник в окнах большей частоты, чем 1 Гц.

Другим фактором, определяющим нестабильность определения коэффициента затухания, является зависимость спектра сигнала от положения рабочего органа на поверхности забоя выработки. Так, в работе [25] показано, что спектр существенно меняется при его регистрации на 1-й, 3-й и 6-й минутах работы комбайна. Для исключения этого эффекта применили усреднение амплитуды спектра во временных окнах большей величины. Однако даже выбор продолжительности окна в 9 мин не привел к устранению этого эффекта. Оказалось, что амплитуда сигнала во второй девятиминутный интервал примерно в два раза больше, чем в первый интервал (рис. 2).

Существенная разница в спектрах сигналов, записанных в первый и второй 9-минутный интервал времени, обусловлена следующими основными причинами: изменением расстояния между источником и приемником «шума» при перемещении рабочего органа комбайна по поверхности забоя, различной трещиноватостью массива по мере углубки рабочего органа в массив и возможной изменчивостью усиления со стороны рабочего органа на массив, а также переходом работы рабочего органа с угля на вмещающие породы. Эти причины приводят к изменчивости показаний текущего прогноза ГДЯ. Минимизи-



зация их влияния на показания прогноза возможна путем увеличения времени усреднения результатов измерения спектров. Для адекватного сравнения результатов прогноза ГДЯ по данным, полученным геофизическим и инструментальным методами, это время должно быть примерно равным прохождению характерной протяженности массива, используемой при инструментальном методе прогноза. Такой характерной величиной является один погонный метр – протяженность участка контрольного шпура, с которого измеряется начальная скорость газовыделения и/или выход штыба при поинтервальном бурении.

На практике при выполнении прогноза методом «по параметрам искусственного акустического сигнала» это время удобно брать равным продолжительности проходки комбайна между циклами крепления выработки, т.к. эта величина близка к 1 м. Проходческому комбайну на проведение выработки на такую глубину требуется, как правило, примерно полчаса.

Для иллюстрации характера изменения спектров с увеличением времени усреднения результатов измерения на рис. 3 приведен спектр того же сигнала, что показан на рис. 2, но с усреднением по времени за 18 мин.

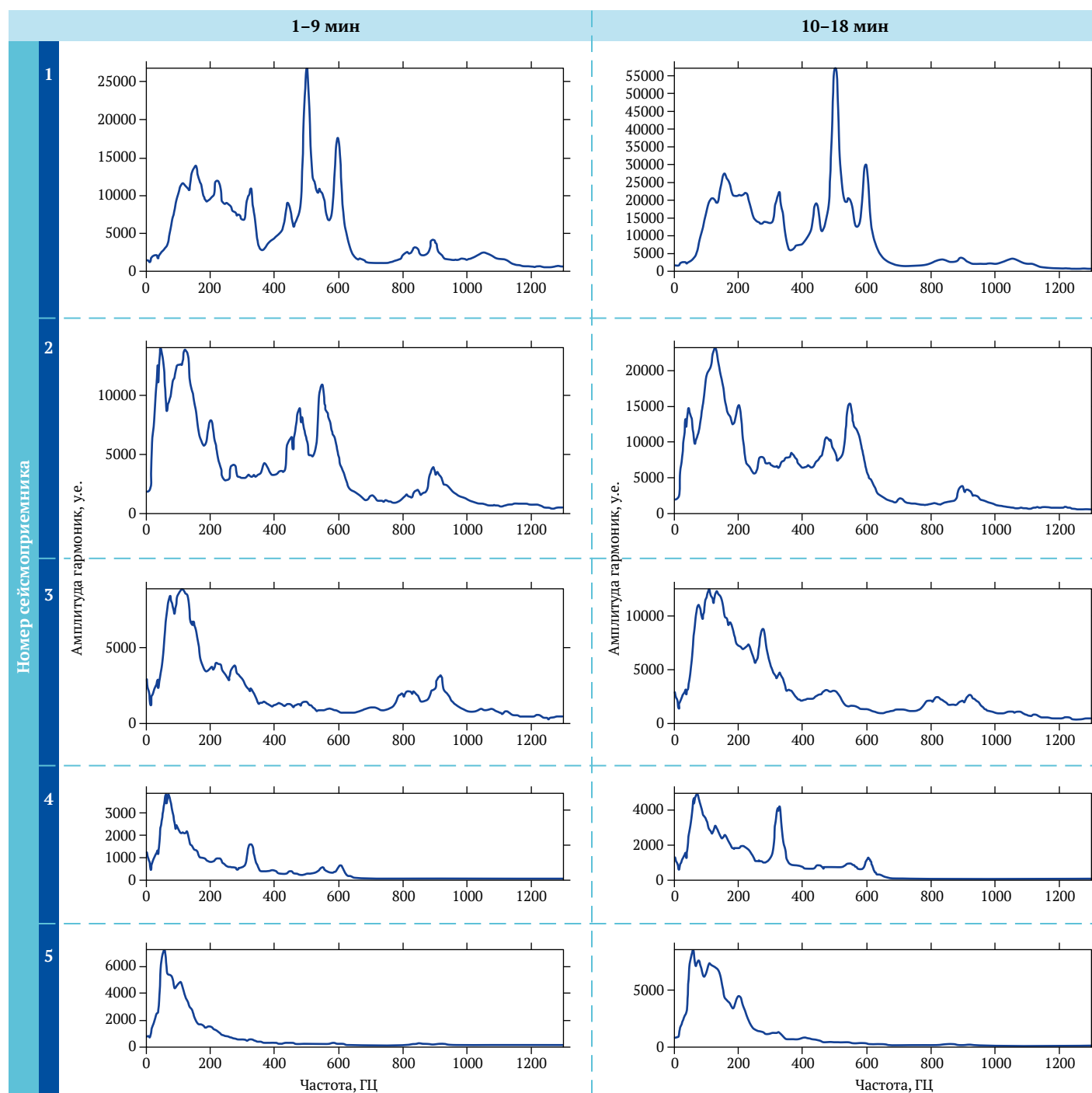


Рис. 2. Линейчатые спектры сигналов с усреднением амплитуд гармоник в частотных окнах по 20 Гц и временных окнах по 9 мин

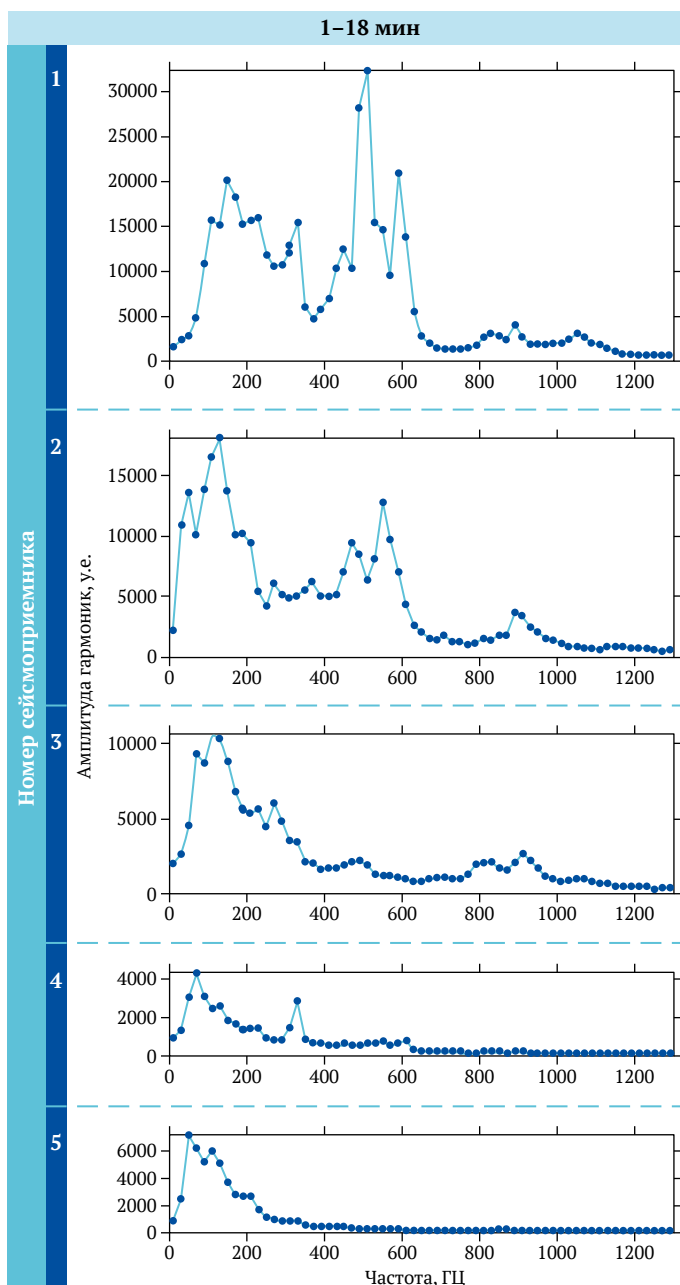
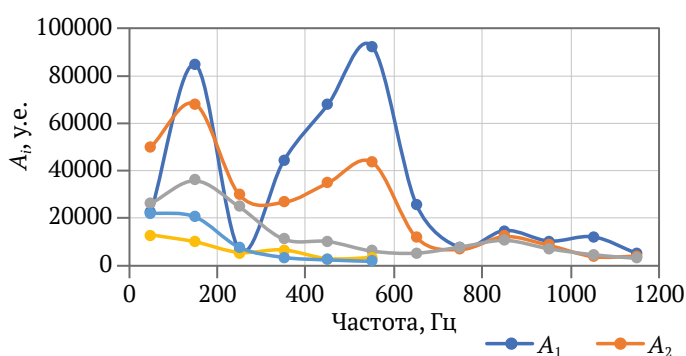
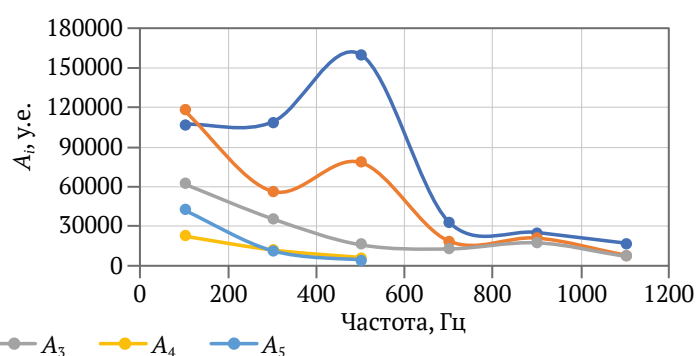


Рис. 3. Линейчатые спектры сигналов с усреднением амплитуд гармоник в частотных окнах по 20 Гц и временном окне в 18 мин



а



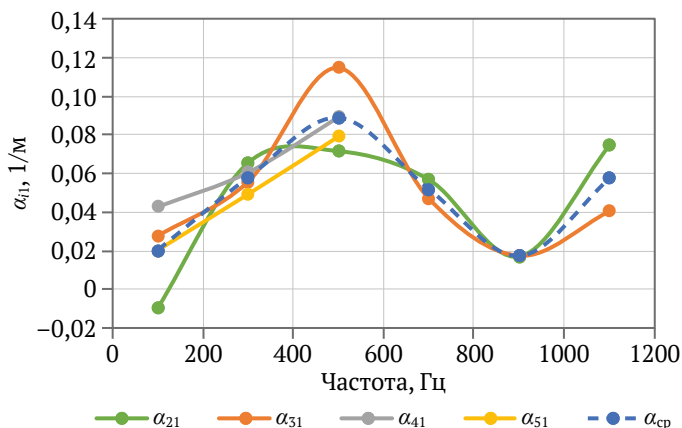
б

Рис. 4. Амплитуды гармоник с СМП №№ 1–5 с усреднением по времени за 18 мин и по частоте окнами по: а – 100 Гц; б – 200 Гц

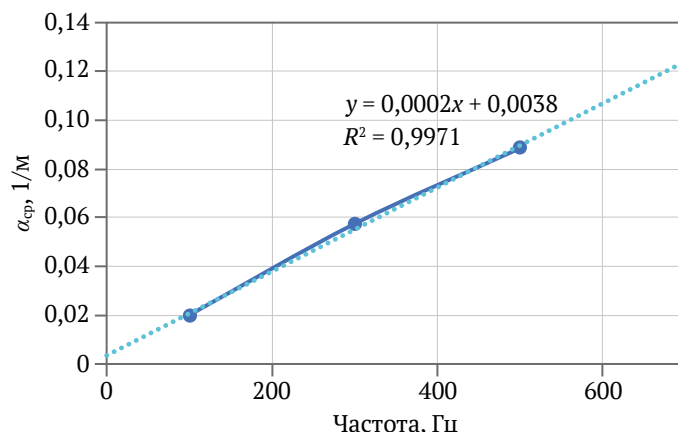
Из рисунка видно, что увеличение продолжительности временного окна усреднения гармоник спектра в два раза существенного изменения в распределении амплитуд гармоник по частотам не привело, но несколько устранило изменчивость амплитуд спектра из-за перемещения рабочего органа комбайна в период работы между остановками для возведения крепи. При этом сохранилась закономерность, в соответствии с которой в низкочастотной части спектра амплитуда гармоник с некоторых более удаленных СМП превышает амплитуду на этих же частотах, зарегистрированных с менее удаленных от излучателя СМП. Однако увеличение протяженности частотного окна усреднения спектра с 1 Гц (рис. 1) до 20 Гц (рис. 2 и рис. 3) несколько уменьшило закономерность, в соответствии с которой в низкочастотной части спектра амплитуда гармоник с некоторых более удаленных СМП превышает амплитуду на этих же частотах, зарегистрированных с менее удаленных от излучателя СМП. Поэтому для исключения этой закономерности стали увеличивать протяженность частотных окон усреднения. Результат уширения частотного окна усреднения гармоник спектра показан на рис. 4. Здесь экспериментальные точки расположены на частотах, соответствующих середине частотного окна.

Из этого рисунка видно, что при окне усреднения в 100 Гц амплитуда суммы гармоник со 2-го СМП в окнах 0–100 и 200–300 Гц превышает амплитуду суммы гармоник в этих же окнах, зарегистрированных 1-м СМП (см. рис. 4, а). Такая же особенность отмечена для 3-го СМП по отношению к 1-му в окне 200–300 Гц. А при увеличении протяженности окна усреднения до 200 Гц (см. рис. 4, б) эта особенность почти исчезла. Установлено, что окончательно данная особенность устраняется при увеличении частотного окна усреднения до 300 Гц (график не показан).

Устранение рассмотренной особенности поведения спектра «шума» комбайна с удалением от источника путем увеличения ширины окон усреднения гармоник по частоте позволило определить эффективный коэффициент затухания сигнала при его прохождении от  $i$ -го СМП до 1-го по формуле (5). Результат показан на рис. 5. Как видно из рисунка, линейность возрастания эффективного коэффициента затухания от частоты обеспечивается в диапазоне 0–500 Гц.



**Рис. 5.** Зависимость от частоты эффективного коэффициента затухания «шума» комбайна  $\alpha_{i1}$  при прохождении его на участках между первым и  $i$ -м СМП и его среднего значения  $\alpha_{cp}$



**Рис. 6.** Зависимость  $\alpha_{cp}$  от частоты  $f$  на участке 100–500 Гц (сплошная линия) и экстраполированная на участок 0–700 Гц линия тренда этой зависимости (пунктирная линия)

На рис. 6 приведена часть графика зависимости  $\alpha_{cp}(f)$ , отображенного на рис. 5, для участка спектра в диапазоне 100–500 Гц, и ее линейаризованная экстраполяция в диапазоне частот 0–700 Гц с коэффициентом детерминации 0,997.

Ранее нами было предложено зависимость коэффициента затухания от частоты и напряженного состояния представить следующим выражением [8]:

$$\alpha_i = \alpha_0 + \beta \frac{f_i}{f_0} \frac{\sigma_{np}}{\sigma_t}, \quad i \in (M_{min}; M), \quad (6)$$

где  $\alpha_i$  – затухание  $i$ -й гармоники,  $m^{-1}$ ;  $\alpha_0$  – затухание гармоники с самой низкой частотой рабочего диапазона геофона в отсутствии напряжений,  $m^{-1}$ ;  $f_i$  и  $f_0$  – соответственно частота  $i$ -й гармоники и минимальной в рабочем диапазоне аппаратуры, Гц;  $\beta$  – параметр, который мы назвали динамическим коэффициентом затухания, определяемый свойствами массива,  $m^{-1}$ ;  $\sigma_{np}$  и  $\sigma_t$  – средние соответственно предельное и текущее значения напряжений в массиве, Па;  $M_{min}$  и  $M$  – номер гармоники соответственно с минимальной и с самой высокой частотой рабочего диапазона геофона.

Из уравнения экстраполяции, полученного программой Excel и приведенного на рис. 6, следует, что в данном случае  $\alpha_0 = 0,0038 m^{-1}$ .

Покажем, как, используя результаты измерения величины эффективного коэффициента затухания в начале и конце линейного участка зависимости  $\alpha_{cp}(f)$ , можно определить величину динамического коэффициента затухания  $\beta$ . Из выражения (6) имеем:

$$\beta = \frac{(\alpha_i - \alpha_0) f_0 \sigma_t}{f_i \sigma_{np}}. \quad (7)$$

Из данных, приведенных на рис. 6, имеем: на частоте, близкой к  $f_0 = 1$  Гц, параметр  $\alpha_0 \approx 0,0038 m^{-1}$ ; на частоте, близкой к  $f = 600$  Гц (диапазон окна 500–700 Гц), параметр  $\alpha_{600} = 0,1238 m^{-1}$ . Подставив эти данные в (7), получим для условий эксперимента:

$$\beta = 0,0002 \frac{\sigma_t}{\sigma_{np}}. \quad (8)$$

Эксперимент проводился на участке, отнесенном инструментальным методом текущего прогноза ГДЯ к неопасным. Следовательно, величина  $\sigma_t/\sigma_{np}$  также имеет неопасное значение. Допустим,  $\sigma_t/\sigma_{np} = 0,6$ . Подставив это значение в (8), получим  $\beta = 0,00012$ . Тогда выражение (6) для данного участка пласта и используемого оборудования для регистрации «шума» работающего оборудования в диапазоне частот 1–600 Гц при условии, что  $f_0 = 1$  Гц, примет вид:

$$\alpha_i = 0,0038 + 0,00012 f_i \frac{\sigma_{np}}{\sigma_t}, \quad m^{-1}; \quad (9)$$

$$f_0 = 1 \text{ Гц}; \quad f_i \in (0; 600 \text{ Гц}).$$

Однако надо отметить, что использовать выражение (9) в алгоритмах определения показателя и критерия опасности проявления ГДЯ методами прогноза, основанными на спектральном анализе «шума» работающего оборудования, следует при усреднении частоты гармоник линейчатого спектра в окнах шириной не менее 200 Гц.

## Заключение

Акустическое излучение от рабочего органа работающего горного оборудования, распространяясь по призабойному пространству горной выработки, несет информацию о напряженном состоянии массива. Основными параметрами акустического излучения, позволяющими оценить напряженное состояние массива, являются рабочий спектр частот и зависимость коэффициента затухания от частоты и горного давления.

Уменьшение амплитуды акустического сигнала по мере удаления от рабочего органа комбайна происходит не монотонно, а имеет осциллирующую составляющую. Причем спектр сигнала сильно изменяется по мере перемещения рабочего органа по поверхности забоя и вглубь массива. Это снижает достоверность определения коэффициента затухания. Для устранения указанного недостатка предложено определять коэффициент затухания по усредненным



во времени данным и в частотных окнах, соответствующих одной гармонике.

Алгоритм определения эффективного коэффициента затухания «шума» работающего проходческого комбайна включает: установку в борт контролируемой выработки на удалении от ее забоя в 20–50 м нескольких сейсмоприемников с одинаковыми техническими характеристиками; одновременную регистрацию ими акустического излучения от рабочего органа комбайна; усреднение амплитуд гармоник во временном окне, равном продолжительности работы комбайна между циклами остановки для крепления бортов выработки, и частотных окнах, равных 200–300 Гц; определение коэффициента затухания

на участках от ближайшего к забою сейсмоприемника до всех остальных с последующим усреднением полученных результатов; построение на основании этих данных зависимости среднего значения коэффициента затухания от частоты и линеаризованной экстраполяции этой зависимости в диапазоне частот 0–700 Гц (или в более широком диапазоне, в котором наблюдается увеличение коэффициента затухания с ростом частоты), с помощью которой производят определение значений параметров  $\alpha_0$  и  $\beta$ , входящих в выражение (6), описывающее зависимость эффективного коэффициента затухания от частоты и напряженного состояния призабойного пространства выработки.

### Список литературы / References

1. Азаров Н.Я., Яковлев Д.В. *Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений*. М.: Недра; 1999. 199 с.  
Azarov N.Ya., Yakovlev D.V. *Seismoacoustic method for predicting mining and geological conditions of coal deposit exploitation*. Moscow: Nedra; 1999. 199 p. (In Russ.)
2. Писецкий В.Б., Лапин С.Э. *Прогноз опасных геодинамических явлений в процессе ведения подземных горных работ*. Екатеринбург: ООО «Ингортех»; 2025. 112 с.  
Pisetsky V.B., Lapin S.E. *Forecast of hazardous geodynamic phenomena in the course of underground mining operations*. Ekaterinburg: Ingortech LLC; 2025. 112 p. (In Russ.)
3. Тайлаков О.В., Уткаев Е.А., Соколов С.В. Особенности применения акустических методов контроля состояния угленосного массива в условиях действующей угольной шахты. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2025;(2):27–33. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2025.73.38.003>  
Tailakov O.V., Utkaeve E.A., Sokolov S.V. Features of the application of acoustic methods for monitoring the condition of a carboniferous massif in an operating coal mine. *Bulletin of Scientific Center VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2025;(2):27–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2025.73.38.003>
4. Шадрин А.В., Зыков В.С. *Акустическая эмиссия выбросоопасных пластов*. М.: ЦНИЭИуголь; 1991. 43 с.  
Shadrin A.V., Zykov V.S. *Acoustic emission of outburst-prone coal seams*. Moscow: TsNIEIugol; 1991. 43 p. (In Russ.)
5. Разумов Е.Е., Простов С.М., Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д. Алгоритмы обработки сейсмической информации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(2):17–19. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_2\\_0\\_17](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_17)  
Razumov E.E., Prostov S.M., Mulev S.N., Rukavishnikov G.D. Seismic information processing algorithms. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(2):17–19. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_2\\_0\\_17](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_17)
6. Lei Y., Wen Z., Wang L. et al. Deterministic cascade evolution in coal and gas outbursts: From early acoustic signatures to system-wide failure. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025;35(6):975–987. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.05.003>
7. Горбачев А.С., Шилов В.И. Аппаратно-программное обеспечение акустических зондирований. *Безопасность труда в промышленности*. 2022;(3):20–25. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-3-20-25>  
Gorbachev A.S., Shilov V.I. Hardware and software for acoustic sounding. *Occupational Safety in Industry*. 2022;(3):20–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-3-20-25>
8. Шадрин А.В. Сущность методов прогноза выбросоопасности угля, основанных на спектральном анализе «шума» работающего оборудования. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2024;(1):5–17. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2024.76.26.001>  
Shadrin A.V. Essence of coal emission hazard prediction methods based on spectral analysis of “noise” of operating equipment. *Bulletin of Scientific Center VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2024;(1):5–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2024.76.26.001>
9. Горбачев А.С., Шилов В.И., Шилов Д.А. Параметры искусственного акустического сигнала в слоистом массиве. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2025;(2):13–26. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2025.34.10.002>  
Gorbachev A.S., Shilov V.I., Shilov D.A. Parameters of artificial acoustic signal in layered massif. *Bulletin of Scientific Center VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2025;(2):13–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2025.34.10.002>



10. Романов В.В., Мальский К.С., Посеренин А.И., Дронов А.Н. Определение затухания сейсмических волн в приповерхностной толще горных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(1):110–116. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-1-0-110-116>  
Romanov V.V., Malskiy K.S., Poserenin A.I., Dronov A.N. Determination of seismic wave attenuation in rocks surrounding underground excavations. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(1):110–116. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-1-0-110-116>
11. Добрынина А.А., Альбари Ж., Дешамп А. и др. Затухание сейсмических волн в литосфере Северо-Танзанийской дивергентной зоны (Восточно-Африканская рифтовая система). *Геология и геофизика*. 2017;58(2):308–322. <https://doi.org/10.15372/GiG20170209> (Перев. вер.: Dobrynina A.A., San'kov V.A., Albaric J. et al. Seismic wave attenuation in the lithosphere of the north tanzanian divergence zone (East African rift system). *Russian Geology and Geophysics*. 2017;58(2):253–265. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.03.016>)  
Dobrynina A.A., San'kov V.A., Albaric J. et al. Seismic wave attenuation in the lithosphere of the north tanzanian divergence zone (East African rift system). *Russian Geology and Geophysics*. 2017;58(2):253–265. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.03.016> (Orig. ver.: Dobrynina A.A., San'kov V.A., Albaric J. et al. Seismic wave attenuation in the lithosphere of the north tanzanian divergence zone (East African rift system). *Geologiya i Geofizika*. 2017;58(2):308–322. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20170209>)
12. Салюков В.С., Куткин Я.О., Вознесенский А.С. Метод экспериментального определения коэффициента затухания в образцах горных пород различных типов и генезиса. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025;(3):15–24. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250302> (Перев. вер.: Salyukov V.S., Kutkin Ya.O., Voznesenskii A.S. Experimental determination of dissipation factor in rock samples of different types and genesis. *Journal of Mining Science*. 2025;61(3):356–364. <https://doi.org/10.1134/S1062739125030020>)  
Salyukov V.S., Kutkin Ya.O., Voznesenskii A.S. Experimental determination of dissipation factor in rock samples of different types and genesis. *Journal of Mining Science*. 2025;61(3):356–364. <https://doi.org/10.1134/S1062739125030020> (Orig. ver.: Salyukov V.S., Kutkin Ya.O., Voznesenskii A.S. Experimental determination of dissipation factor in rock samples of different types and genesis. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2025;(3):15–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250302>)
13. Иванов П.Н., Безруков В.И. Экспериментальное исследование упругих свойств углей различной степени тектонической нарушенности методом лазерно-ультра-звуковой спектроскопии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(4–1):26–40. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_41\\_0\\_26](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_41_0_26)  
Ivanov P.N., Bezrukov V.I. Experimental study of elastic properties of coals of various degrees of tectonic disturbance by laser-ultrasonic spectroscopy. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(4–1):26–40. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_41\\_0\\_26](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_41_0_26)
14. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. *Геофизический контроль в угольных шахтах*. Киев: Наукова думка; 1978. 224 с.  
Glushko V.T., Yamshchikov V.S., Yalansky A.A. *Geophysical control in coal mines*. Kyiv: Naukova Dumka; 1978. 224 p. (In Russ.)
15. *Горная энциклопедия*. В 5 т. Т. 1. Гл. ред. Е.А. Козловский; Ред. кол. М.И. Агошков, Н.К. Байбаков, А.С. Болдырев и др. М.: Советская энциклопедия; 1984. С. 83.  
Kozlovsky E.A. (Ed.) *Mining encyclopedia*. In 5 vols. Vol. 1. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1984. P. 83. (In Russ.)
16. Чабан И.А. Затухание звука в грунтах и горных породах. *Акустический журнал*. 1993;39(2):362–369.  
Chaban I.A. Sound attenuation in soils and rocks. *Acoustical Physics*. 1993;39(2):362–369. (In Russ.)
17. Ноздрев В.Ф. *Молекулярная акустика*. М.: Высшая школа; 1974. 288 с.  
Nozdrev V.F. *Molecular acoustics*. Moscow: Vysshaya shkola; 1974. 288 p. (In Russ.)
18. Новик Г.Я., Ржевская С.В. *Физико-техническое обеспечение горного производства*. М.: Недра, 1995. 256 с.  
Novik G.Ya., Rzhetskaya S.V. *Physical and technical support of mining production*. Moscow: Nedra; 1995. 256 p. (In Russ.)
19. Зацепин А.Ф. *Акустический контроль*. В 2 ч. Ч 1. Введение в физику акустического контроля. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ; 2005. 88 с.  
Zatsepin A.F. *Acoustic control*. In 2 parts. Part 1. Introduction to the physics of acoustic control. Yekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI; 2005. 88 p. (In Russ.)
20. Wojtecki Ł., Kurzeja J., Knopik M., The influence of mining factors on seismic activity during longwall mining of a coal seam. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021;31(2):429–437. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.01.010>
21. Pan Y., Lin S., Yang D. et al. A review of influencing factors on teleseismic traveltime tomography. *Earthquake Science*. 2023;36(3):228–253. <https://doi.org/10.1016/j.egs.2022.16.006>
22. Jiao Y.Y., Wu K., Zou J. et al. On the strong earth-quakes induced by deep coal mining under thick strata – a case study. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2021;7:97. <https://doi.org/10.1007/s40948-021-00301-1>



23. Шевченко Ю.В., Яковенко Ю.В. Класс землетрясений по коде. *Вулканология и сейсмология*. 2020;(2):69–78. <https://doi.org/10.31857/S0203030620020078> (Перев. вер.: Shevchenko Y.V., Yakovenko V.V. The coda-based earthquake energy class. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2020;14(2):127–135. <https://doi.org/10.1134/S0742046320020074>)  
Shevchenko Y.V., Yakovenko V.V. The coda-based earthquake energy class. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2020;14(2):127–135. <https://doi.org/10.1134/S0742046320020074> (Orig. ver.: Shevchenko Y.V., Yakovenko V.V. The coda-based earthquake energy class. *Vulkanologiya i Seismologiya*. 2020;(2):69–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0203030620020078>)
24. Захаров В.Н., Гуляев П.Н., Харченко А.В. Исследование акусто-вибрационных процессов углеродного массива в зонах ведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005;(6):69–74.  
Zakharov V.N., Gulyaev P.N., Kharchenko A.V. Investigation of acoustic-vibration processes of the coal-rock mass in mining zones. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2005;(6):69–74. (In Russ.)
25. Шадрин А.В., Шнайдер И.В. Влияние удаления сейсмоприемника от забоя выработки на спектр акустического излучения комбайна при прогнозе динамических явлений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2025;(1):722–737.  
Shadrin A.V., Shnayder I.V. The influence of removing the seismic receiver from the face of the mine plane on the acoustic radiation spectrum of the combine when the forecast of dynamic phenomena. *News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2025;(1):722–737. (In Russ.)

### Информация об авторе

**Александр Васильевич Шадрин** – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0009-0006-1891-3328](https://orcid.org/0009-0006-1891-3328), Scopus ID [56234018500](https://scopus.org/56234018500), ResearcherID [AAC-9483-2022](https://researcherid.org/AAC-9483-2022), SPIN-код [5206-4952](https://spinin.ru/5206-4952); e-mail [avsh-357@mail.ru](mailto:avsh-357@mail.ru)

### Information about the author

**Aleksandr V. Shadrin** – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FRC CCC SB RAS), Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0009-0006-1891-3328](https://orcid.org/0009-0006-1891-3328), Scopus ID [56234018500](https://scopus.org/56234018500), ResearcherID [AAC-9483-2022](https://researcherid.org/AAC-9483-2022), SPIN [5206-4952](https://spinin.ru/5206-4952); e-mail [avsh-357@mail.ru](mailto:avsh-357@mail.ru)

|                                |            |          |            |
|--------------------------------|------------|----------|------------|
| Поступила в редакцию           | 25.11.2025 | Received | 25.11.2025 |
| Поступила после рецензирования | 20.02.2026 | Revised  | 20.02.2026 |
| Принята к публикации           | 12.03.2026 | Accepted | 12.03.2026 |