ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2):142-155
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.34+550.8.05 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_142

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПАССИВНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

А.В. Азаров[1], А.С. Сердюков[1], В.В. Сказка[2], И.М. Сердюк[2]

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: antonazv@mail.ru
[2] Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация: Рассмотрена проблема мониторинга состояния элементов конструкции подземных сооружений и состояния геологической среды в их близи на основе использования наблюдений за естественным сейсмическим шумом. Приводятся результаты полевых экспериментов, проведенных в Томусинском железнодорожном тоннеле в Кемеровской области. Представлены особенности спектральных характеристик зарегистрированных сейсмических сигналов, полученных в результате пассивных наблюдений с использованием трехкомпонентных приемников, расположенных на основании туннеля. С целью установления закономерностей формирования естественного волнового поля на поверхности подземного сооружения при наличии зоны геологической нарушенности вблизи него была разработана трехмерная математическая модель. В ней подземное сооружение представляется цилиндрической полостью, а зона нарушенности областью кубической формы с отличными от вмещающей среды свойствами. Распространение волн моделируется на основе численного решения уравнений упругости методом спектральных элементов, реализованным в программном пакете SpecFEM3d. Естественный шум реализуется путем введения в модель множества источников со случайными механизмами и сигналами. Представлены результаты численных экспериментов. Показано, как свойства геологической среды, нарушенной зоны и размеры этой зоны влияют на характеристики формируемого волнового поля на поверхности цилиндрической полости. Проанализированы зависимости спектральных характеристик синтетических сигналов от параметров модели.

Ключевые слова: подземные сооружения, сейсмический мониторинг, пассивная сейсмика, контроль состояния подземных сооружений, контроль состояния горных пород, математическое моделирование, обработка данных.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00192, https://rscf.ru/project/24-27-00192/.

Для цитирования: *Азаров А. В., Сердюков А. С., Сказка В. В., Сердюк И. М.* Исследование возможностей пассивного сейсмического мониторинга при решении задачи контроля состояния подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 142–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_142.

Capabilities of passive seismic monitoring in condition assessment of underground constructions

A.V. Azarov[1], A.S. Serdyukov[1], V.V. Skazka[2], I.M. Serdyuk[2]

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, e-mail: antonazv@mail.ru
[2] Institute of Mining N.A. Chinakala Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Abstract: Condition monitoring of structural components of underground constructions and enclosing geological medium is discussed in the context of observations over their natural noise. The article describes the results of the field experiments carried out in the Tomusinsk railway tunnel in the Kemerovo Region. The spectral characteristics of seismic signals recorded during passive monitoring using three-component receivers placed at the tunnel sub-base are described. Aimed to determine the mechanisms of the natural wave field on the surface of an underground construction with a geological discontinuity nearby, 3D mathematical model was developed. The model represents an underground construction as a cylindrical cavity and a discontinuity zone as a cubic domain with the properties different from the properties of the enclosing medium. The wave propagation is modeled on the basis of the numerical solution of elasticity equations by the spectral element method in SpecFEM3d. Natural noise is modeled by introducing the model with many sources with random mechanisms and signals. The numerical experimentation results are described. It is shown how the properties of a geological medium and a discontinuity zone, as well as the sizes of the latter influence the wave field characteristics on the surface of a cylindrical cavity. The spectral characteristics of a synthetic signal are analyzed in relation to the model parameters.

Key words: underground constructions, seismic monitoring, passive seismics, condition assessment of underground constructions, rock mass condition monitoring, mathematical modeling, data processing.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 24-27-00192, https://rscf.ru/project/24-27-00192/.

For citation: Azarov A. V., Serdyukov A. S., Skazka V. V., Serdyuk I. M. Capabilities of passive seismic monitoring in condition assessment of underground constructions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2):142-155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_142.

Введение

Мониторинг состояния подземных сооружений и горных пород способствует повышению эффективности и безопасности работ по добыче твердых полезных ископаемых подземным способом. В настоящее время для решения этой задачи применяются различные подходы, основанные, например, на визуальном осмотре [1], измерениях деформаций [2—4], геофизических методах [5—7]. Среди последних широкое распространение в горном деле получили сейсмоакустические методы. С их помощью решается множество задач, в том числе задачи определения и контроля свойств породного массива в окрестности горных выработок. Результаты подобных исследований следует использовать при дальнейшем планировании работ по гидроизоляции, укреплению пород и элементов конструкций подземных сооружений.

Сейсмоакустические методы можно разделить на активные и пассивные. В первом случае при исследованиях используются искусственные источники, которые генерируют объемные или поверхностные/туннельные волны, распространяющиеся вдоль поверхностей горных выработок. На основе объемных волн возможно реализовать сейсмотомографические методы по определению уровня трещиноватости горных пород [8].

В работах [9—11] предлагается выявлять опасные зоны вблизи подземных сооружений посредством регистрации и обработки поверхностных волн. К активной группе можно отнести методы, основанные на анализе колебаний элементов конструкции. Например, в работе [12] с помощью такого подхода диагностируются крепления анкерных болтов (в данном случае анализируются акустические и ультразвуковые волны). В исследовании [13] предлагается анализировать динамический отклик от всей системы «подземное сооружение — окружающая среда» с целью контроля состояния объектов.

Большое количество работ посвящено разработке методов, основанных на использовании естественного сейсмического шума (пассивные методы). Этот шум может генерироваться геодинамическими процессами, которые протекают в горной породе [14] и имеют различные механизмы излучения [15]. На основе обработки естественных сейсмических волн, например, решается задача определения областей неустойчивости породного массива [16], прогнозирования горных ударов [17], контроля напряженного состояния [18], проводится поиск разломов горной породы [19], оцениваются параметры развивающихся трещин [20], производится поиск областей с активными деформационными процессами [21].

В данной работе развиваются методы, основанные на использовании естественного сейсмического излучения. Целью работы является исследование возможностей использования пассивных сейсмических данных для определения зон изменения физико-механических свойств массива горных пород и разрушенных областей горных пород вблизи подземных сооружений. Проводится анализ данных полевого эксперимента, предлагается математическая модель формирования естественного волнового поля внутри породного массива, анализируются результаты численных экспериментов.

Полевые эксперименты

С целью изучения характеристик естественного сейсмического шума внутри подземного сооружения были проведены полевые эксперименты в Томусинском железнодорожном тоннеле, расположенном в Кемеровской области. Общая протяженность тоннеля составляет 1160 м, его высота 5,5 м. В качестве аппаратуры использовались сейсморегистраторы «SCOUT» и трехкомпонентные сейсмоприемники с геофонами GS-ONE 10 Гц.

Методика эксперимента была следующей. Пять сейсмоприемников устанавливалось на центр основания туннеля в линию вдоль его оси. Расстояние между соседними приемниками в линии наблюдения составляло 5 м. Естественный сейсмический шум записывался в течение 3 мин. После этого производился перенос системы наблюдения на новую позицию. Путем таких действий тоннель был обследован в различных точках с шагом 5 м. Суммарно за два дня работ было обследовано 875 м тоннеля.

Следующий шаг заключался в обработке полученных сейсмических данных. На рис. 1 представлена спектральная плотность энергии записей вертикаль-

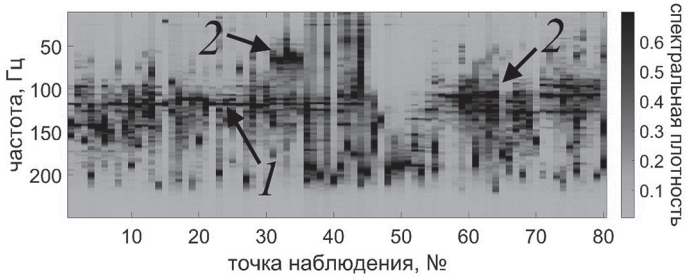


Рис. 1. Спектральная плотность энергии сигналов с вертикальной компоненты сейсмоприемника в зависимости от точки наблюдения и частоты. Градациями серого цвета показано значение спектральной плотности

Fig. 1. Spectral energy density of signals from the vertical component of the seismic receiver depending on the observation point and frequency. The value of the spectral density is shown in grayscale

ной компоненты скоростей смещений в зависимости от точки наблюдения и частоты. Как видно, основная энергия колебаний сосредоточена в диапазоне от 100 до 150 Гц. В некоторых точках наблюдается повышение энергии в достаточно узкой полосе частот (рис. 1, *1*). Такие пики в спектре обусловлены наличием гармонических сигналов, источниками которых, по всей видимости, являются колебания элементов конструкции тоннеля, например его обделки. Также на рисунке можно заметить локализованные области повышенной спектральной энергии, но в более широком частотном диапазоне (см. рис. 1, *2*). Здесь уже определенно нельзя сказать, с чем они связаны. Одно из предположений — нарушения целостности конструкции туннеля или геологической среды вокруг него. Например, образуются стоячие волны вследствие наличия неоднородностей из-за дефектов.

Помимо этого, существуют области, где в некотором частотном диапазоне уровень сейсмической энергии снижается. Ярко этот эффект проявляется в местах, где наблюдалось просачивание воды на стенах тоннеля. Снижение амплитуд сигналов происходит на всех трех компонентах, но сильнее всего — на вертикальной. Для обнаружения таких зон оказалось удобным рассматривать отношения амплитуд различных компо-

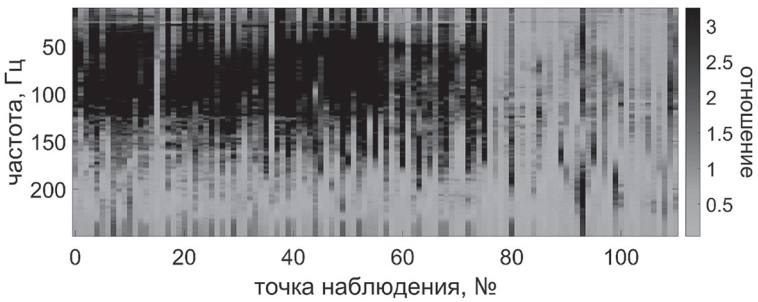


Рис. 2. Отношение спектральной плотности записей вертикальных компонент к горизонтальным, ориентированным перпендикулярно оси туннеля, в зависимости от точки наблюдения и частоты. Градациями серого цвета указано значение отношения

Fig. 2. The ratio of the spectral density of the signal on the vertical component to the horizontal one, oriented perpendicular to the axis of the tunnel, depending on the observation point and frequency. The value of the ratio is indicated in grayscale

нент зафиксированных колебаний. Например, на рис. 2 изображено отношение спектральной плотности вертикальной компоненты к горизонтальной, ориентированной перпендикулярно оси туннеля, в зависимости от точки наблюдения и частоты. До 70-й точки наблюдения в тоннеле было сухо. После 70-й точки было много воды, которая просачивалась из трещин в обделке. Как видно, отношение после 70-й точки наблюдения в диапазоне от 10 до 150 Гц значительно изменилось. Здесь больше всего изменилось значение вертикальной составляющей перемещений.

Далее рассмотрим математическую модель, которая может объяснять особенности наблюдаемых сигналов.

Математическая модель

В рамках работы построена трехмерная математическая модель, которая описывает возникновение естественного волнового поля на поверхности подземного сооружения при наличии нарушенной области геологической среды вблизи от него.

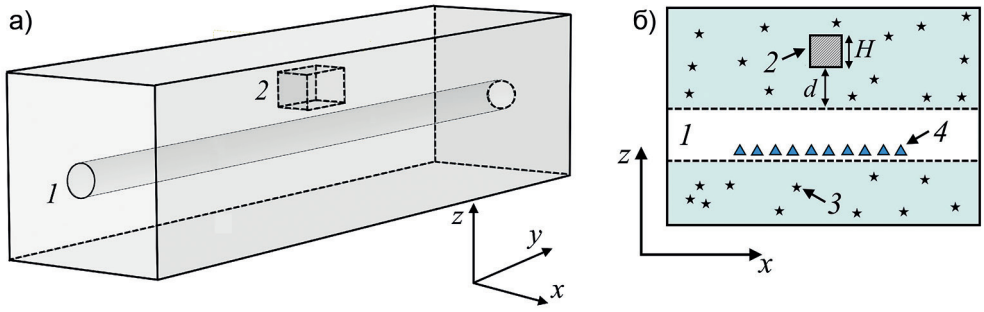
На рис. 3 представлена геометрия модели. Расчетная область конечных размеров содержит цилиндрическую полостью, которая играет роль подземного сооружения (горная проходка, туннель и т.д.). Нарушение геологической среды представлено неоднородным включением кубической формы (рис. 3, *2*). В работе включение задавалось как:

- Полость. В этом случае на гранях куба устанавливались условия свободной поверхности.
- Материал со скоростными свойствами ниже, чем у вмещающей среды. Здесь делается допущение, что при разрушении материала скорости распространения волн в нем уменьшаются.

Размеры включения в модели выбирались так, чтобы они были близки к размерам поперечного сечения полости.

Распространение волн в среде моделируется на основе решения системы уравнений упругости с помощью метода спектральных элементов [22]. Использовался программный пакет SpecFEM3d [23].

Естественный сейсмический шум моделировался путем введения в расчетную область множества одновременно действующих источников точечного типа. Схематично они изображены звездочками на рис. 3, *б*. Общее их число составляло 5214. Сейсмические источники описывались тензором сейсмического момента, шесть компонент



1 – цилиндрическая полость, 2 – включение в среде,
3 – источники сейсмического излучения, 4 – приемники

Рис. 3. Геометрия модели для расчета синтетических данных пассивного сейсмического мониторинга: трехмерный вид (а); срез в плоскости xz (б);

Fig. 3. Geometry of the model for calculating synthetic passive seismic monitoring data: three-dimensional view (a); section in the xz plane. The numbers indicate (b)

которого выбирались случайным образом. Сигнал в источниках создавался в несколько этапов. На первом производилась генерация гауссовского шума. Затем его спектральная плотность на частоте f изменялась по правилу A/f, где A — плотность спектра изначального гауссовского шума на частоте f. Это было сделано для того, чтобы не получать большие значения энергии на высоких частотах при накоплении сигнала в точке приемника. И на последнем этапе к сигналу применялся полосовой фильтр от 10 до 250 Гц, так как именно это частотный диапазон регистрировался в полевых экспериментах (этот диапазон связан с ограничениями используемой сейсмической аппаратуры). Дополнительно к этому обрезка высоких частот позволяет избежать численной дисперсии при расчетах.

Так как расчетная область ограничена таким образом, чтобы убрать отраженные волны, на ее границах устанавливались поглощающие слои. Поверхность цилиндрической полости являлась свободной.

С целью удобства изложения результатов были также введены обозначения, часть из которых указаны на рис. 3, *б*: d — расстояние от поверхности цилиндрической полости до включения; H — длина стороны куба, ограничивающего включение; V_p — скорость продольных волн вмещающей среды; V_s — скорость поперечных волн вмещающей сред; ρ — плотность вмещающей среды; V_p', V_s', ρ' — соответствующие параметры для неоднородного включения. В численных экспериментах будем определять только V_p, из которого будет вычисляться скорость пробега продольных

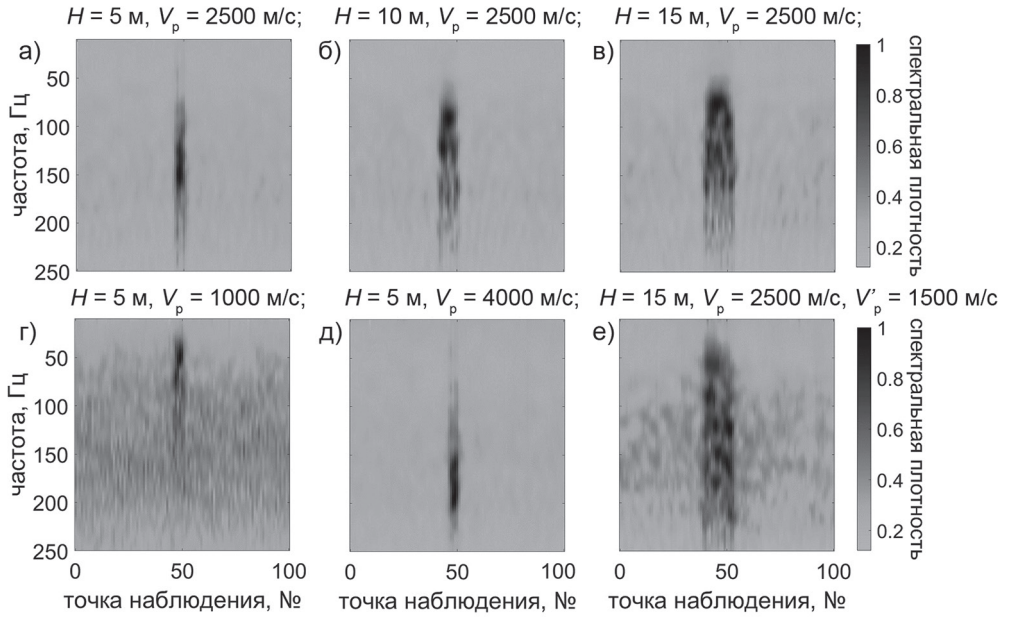


Рис. 4. Спектральная плотность сигналов в зависимости от точки наблюдения на поверхности цилиндрической полости при d = 1 м и различных параметров модели: в роли включения выступает полость (а–д); включение задается материалом с упругими параметрами, меньшими, чем у вмещающей среды (е)

Fig. 4. Spectral density of signals depending on the point of overlap on the surface of a cylindrical cavity at d = 1 m and various parameters of the model: inclusion is a cavity (a–d); inclusion is determined by a material with elastic parameters lower than that of the host medium (e)

волн как $V_s = V_p / \sqrt{3}$. Размеры расчетной области зададим 50×200×50 м, радиус цилиндрической полости 2,5 м. Размеры включения и скоростные параметры среды изменялись в ходе экспериментов.

Численные эксперименты

На основе построенной математической модели была проведена серия численных экспериментов, в которых менялись параметры модели. Результаты численных расчетов выдавались в виде синтетических сейсмограмм, которые представляли собой записи скоростей смещения среды в точках на поверхности цилиндрической полости по линии, направленной вдоль ее оси, с шагом 1 м. Линия наблюдения располагалась со стороны включения.

На рис. 4 приведены спектральные плотности энергии полученных синтетических сигналов в зависимости от частоты и точки наблюдения на поверхности цилиндрической полости. Расстояние *d* было равно одному метру. На всех приведенных рисунках над включением наблюдается повышение значений спектральной плотности (включение находится в окрестности точки наблюдения № 50). При этом характеристики получаемых спектров зависят от параметров модели. Например, рассмотрим случай, когда в роли включения выступает полость. Тогда увеличение ее размеров приводит к увеличению размеров зоны повышенной спектральной плотности и смещению этой зоны в область низких частот (см. рис. 4, *а—в*, где показаны спектры в зависимости от точки наблюдения для *H*, равного 5, 10 и 15 м соответственно). Увеличение скорости распространения упругих волн вмещающей среды приводит к смещению зоны повышенной спектральной плотности в область высоких частот (см. рис. 4, *г, д*, где показаны спектры для скорости вмещающей среды V_p = 1000 м/с и V_p = 4000 м/с соответственно). На рис. 4, *е* показана спектральная плотность для случая, когда включение задавалось материалом с низкими скоростными характеристиками. В данном случае для вмещающей среды V_p = 2500 м/с, V_s = 1443 м/с, а для включения V_p' = = 1500 м/с, V_s' = 866 м/с.

При рассмотрении включения в виде полости во всех случаях в точках над ней наблюдается повышение спектральной энергии в определенном частотном диапазоне с выраженным максимумом. Например, на рис. 5, *а* приведен спектр для размера полости *H* = 5 м, V_p = = 2500 м/с, V_s = 1443 м/с. Здесь наблюда-

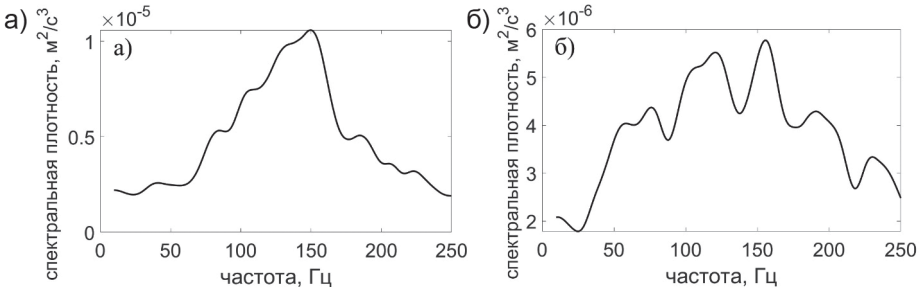
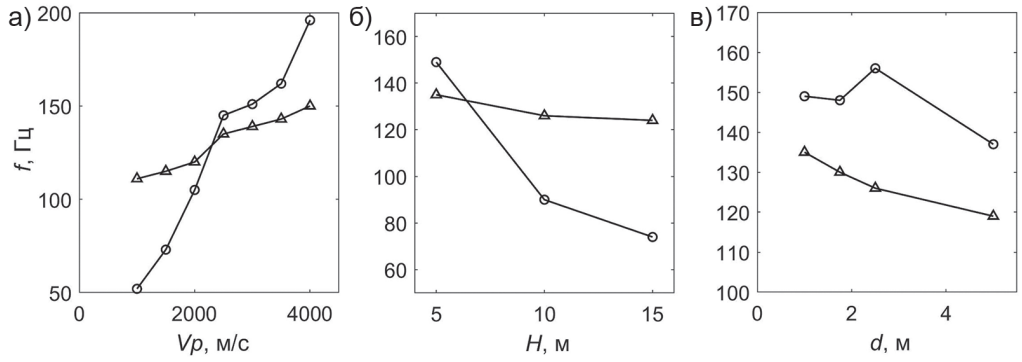


Рис. 5. Спектральная плотность энергии на приемнике в точке напротив неоднородности в случае, когда в роли неоднородности выступает: полость размером H = 5 м (а); низкоскоростное включение размером H = 15 м (б)

Fig. 5. Spectral energy density at the receiver at a point opposite the inhomogeneity in the case when the inhomogeneity is: a cavity with a size of H = 5 meters (a); a low-speed switch with a size of H = 15 meters (b)



○ – положение максимума спектральной плотности; Δ – положение центра масс спектральной энергии

Рис. 6. Максимум частоты сигнала и положение центра масс спектральной плотности в зависимости от параметров модели в случае, когда в роли включения выступает полость: зависимость от скоростных свойств вмещающей среды ($V_s = V_p / \sqrt{3}$) (а); от размеров включения (б); вот расстояния между цилиндрической полостью и включением (в)

Fig. 6. The maximum frequency of the signal and the position of the center of mass of the spectral density depending on the model parameters in the case when the cavity acts as an inclusion: dependence on the velocity properties of the host medium ($V_s = V_p / \sqrt{3}$) (a); on the size of the inclusion (b); on the distance between the cylindrical cavity and the inclusion (v)

ется повышение плотности спектральной энергии в диапазоне от 60 до 200 Гц с максимумом на 149 Гц. Локализация энергии по частоте зависит от размеров полости: чем больше размер полости, тем в более широком частотном диапазоне повышается энергия. Также в численных экспериментах было получено, что при достаточно малых значениях H повышение энергии над полостью не наблюдается. В построенной модели при H = 2,5 м и V_p = 2500 м/с уже не наблюдалось изменения в спектре, т.е. полость не влияла на результирующее волновое поле. Это связано с тем, что длина волны становится намного больше неоднородности, из-за чего их взаимодействие не происходит.

Если включение задать как низкоскоростной материал, то будет наблюдаться повышение спектральной энергии в некотором диапазоне частот, но без ярко выраженного максимума. Пример такого спектра для H = 15 м приведен на рис. 5, *б*. Изменение размеров включения в этом случае не приводит к локализации энергии по частоте. Все спектры получаются схожими с теми, что представлены на рис. 4, *е* и рис. 5, *б*.

На рис. 6 представлены спектральные характеристики сигналов в точках напротив включения в зависимости от различных параметров модели. В данном случае в роли включения выступает полость. На рисунке отрисована частота максимума спектра (точки обозначены кругами) и положения центра масс спектральной плотности (точки обозначены треугольниками), который рассчитывался по причине того, что в некоторых случаях явного максимума в спектре не наблюдалось. Увеличение скорости волн в среде приводит к увеличению частоты наблюдаемого сигнала (см. рис. 6, *а*). Увеличение размеров включения H и расстояния от него цилиндрической полости d приводит к понижению частот (см. рис. 6, *б* и 6, *в* соответственно). На рис. 6, *б* наблюдается отклонение максимума частоты при 2,5 м, из-за того что в спектре не наблюдалось явно выделяющегося пика

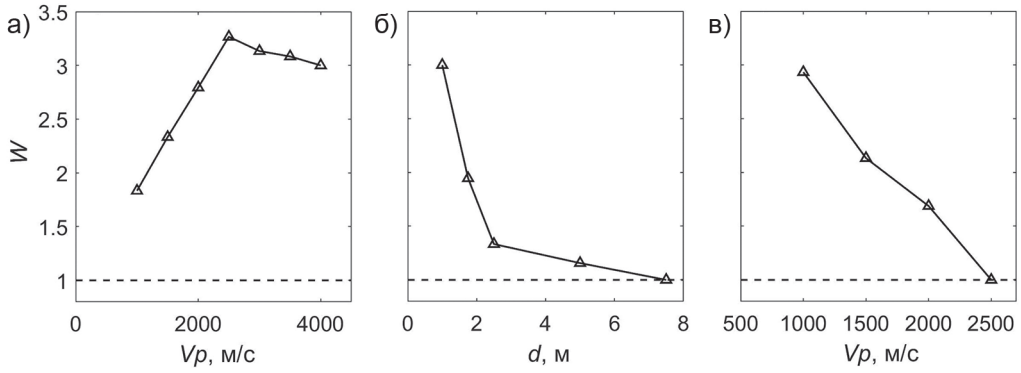
(подобно тому, как это представлено на рис. 5, *б*). Из-за этого использование максимума может оказаться не совсем подходящим для оценки характеристик неоднородностей.

Схожая картина наблюдается и для случая, когда включение задается как низкоскоростной материал. Например, проводилась серия численных экспериментов, где изменялась скорость вмещающей среды. Скоростные свойства для материала включения устанавливались на 40% ниже, чем у вмещающей среды. Тогда для скорости продольной волны вмещающей среды, равной 1000, 1500, 2000, 2500 м/с, и поперечной 577, 866, 1155, 1443 м/с максимум частоты сигнала находился на 81, 125, 153 и 150 Гц соответственно, а центр спектра масс на 123, 124, 129 и 132 Гц.

Изменение упругих свойств низкоскоростного включения практически не влияет на частотные характеристики сигнала. Например, при скорости вмещающей среды V_p = 2500 м/с, V_s = 1443 м/с и скорости материала включения V_p, равной 1000, 1500 и 2000 м/с, максимум частоты находился на 131, 132 и 133 Гц соответственно, центр массы спектральной плотности на 154, 153 и 154 Гц.

Далее исследуем возможность определения включения по уровню энергии колебаний в зависимости от параметров модели. Для этого будем рассчитывать отношение $W = E_1/E_2$, где E_1 — сумма энергии колебаний в выделенном диапазоне частот в точках на поверхности цилиндрической, расположенных напротив включения (*y*-координата выбранных точек совпадает с *y*-координатами позиции полости); E_2 — сумма энергии колебаний в точках вдали от включения. Чем это значение выше, тем надежность регистрации неоднородности выше (повышается контраст).

На рис. 7, *а*, *б* показано отношение *W* для случая, когда в качестве включения выступает полость с размером *H* = = 5 м. При вычислении *W* энергия ко-



– – – – – значение 1, при котором фиксирование включения невозможно

Рис. 7. Отношение энергии колебаний в диапазоне 10–250 Гц в точке напротив включения к энергии колебаний в точках вдали от включения в зависимости от: скорости волн во вмещающей среде в случае включения в виде полости (а); расстояния между включением и поверхностью полости d (включение в виде полости) (б); скорости материала включения (включение в виде низкоскоростного материала) (в). Пунктирной линией указано

Fig. 7. The ratio of the seismic energy in the frequency range of 10–250 Hz at the point opposite the switch on to the oscillation energy at points away from the switch on, depending on: speed of waves in the host medium in the case (turning on as a cavity) (a); distance between the switch on and the surface of the cavity d (turning on as a cavity) (b); speed of the inclusion material (inclusion in the form of low-speed material) (v)

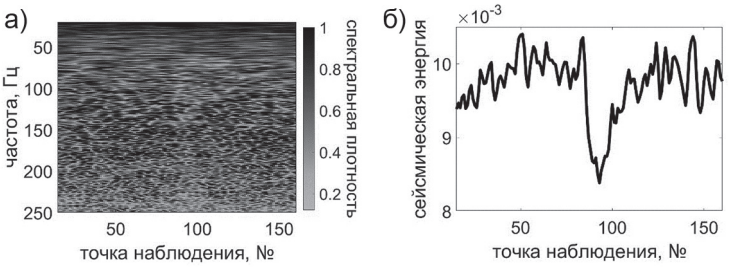


Рис. 8. Результат численного эксперимента при введении в модель области с высоким поглощением волн: спектр сигнала в зависимости от точки наблюдения (а); суммарная энергия колебаний в диапазоне 10—250 Гц, в зависимости от точки наблюдения (б)

Fig. 8. The result of the numerical modelling when a high attenuation area is introduced into the model: signal spectrum depending on the observation point (a); total oscillation energy in the range from 10 to 250 Hz, depending on the observation point (b)

лебаний суммировалась в диапазоне 10—250 Гц. С повышением скорости пробега упругих волн вмещающей среды наблюдалось повышение W до значений V_p = 2500 м/с. Далее происходило снижение, которое обусловлено тем, что частотные характеристики регистрируемого сигнала увеличивались и выходили за диапазон суммирования. Увеличение расстояния между включением и цилиндрической полостью d приводило к резкому снижению отношения (см. рис. 7, *б*). На расстоянии 7,5 м W становилось равным единице, т.е. определить, есть включение или нет, невозможно.

На рис. 7, *в* показано W для случая, когда включение является низкоскоростным материалом. Скорость вмещающей среды составляла 2500 м/с, скорость включения изменялась от 1000 до 2500 м/с. Ожидаемо снижение контраста между вмещающей средой и включением приводит к понижению отношения.

Проводились также эксперименты, в которых в области включения задавалось поглощение волн. Несмотря на высокие параметры для поглощения, в построенной модели его эффект был незначительный из-за малых размеров включения по сравнению с возникающими длинами волн. Например, на рис. 8, *а* изображен спектр вертикальных колебаний в зависимости от точки наблюдения и размеров H = 15 м. Скоростные параметры включения при этом устанавливались как у вмещающей среды. На рис. 8, *б* приведена суммарная энергия вертикальных колебаний в диапазоне 10—250 Гц, где видно снижение напротив области с поглощением. На других компонентах этот эффект был менее выражен или практически не проявлялся. Отношение компонент не позволяло улучшить результат в плане обнаружения области с высоким поглощением волн.

Во всех примерах выше линия наблюдения находилась на цилиндрической полости с той же стороны, что и включение. При удалении от этой линии, например на боковую поверхность под 90° от вертикального направления, эффекты заметно снижались. На линии, расположенной с противоположной стороны от включения, особенности в спектре во всех экспериментах не наблюдались. Рассмотрение отношения компонент не приводило к более выраженному проявлению наблюдаемых изменений.

Выводы

В работе были рассмотрены возможности использования данных пассивных сейсмических наблюдений для решения задачи мониторинга состояния элемен-

тов конструкции подземных сооружений и состояния геологической среды вблизи от них. Представлены результаты полевых экспериментов в железнодорожном тоннеле, которые показывают, что в некоторых точках тоннеля наблюдаются повышения или понижения сейсмической энергии в определенном диапазоне частот. Сделано предположение, что эти особенности могут быть связаны с наличием дефектов в конструкции сооружения или наличием нарушений геологической среды вблизи. С целью проверки гипотезы была построена трехмерная математическая модель, описывающая формирование волнового поля от множества источников со случайным механизмом и сигналом на поверхности цилиндрической полости при наличии рядом расположенного включения, которое играло роль разрушенной зоны. На основе численных экспериментов было получено, что в точках на поверхности полости напротив включения наблюдается повышение сейсмической энергии в некотором диапазоне частот, как это наблюдается на реальных данных.

Причем, на построенной модели было показано, что:

- увеличение скорости вмещающей среды приводит к увеличению частоты, на которой наблюдается повышение спектральной энергии;
- увеличение размеров области включения способствует к снижению частоты, на которой наблюдается повышение спектральной энергии, однако повышение спектральной энергии начинает проявляться в более широком диапазоне частот;
- уменьшение расстояния между включением и цилиндрической полостью, а также уменьшение упругих характеристик включения по сравнению с вмещающей средой, приводит к повышению энергии волнового поля, наблюдаемого на поверхности полости напротив включения;
- увеличение скорости распространения упругих волн во вмещающей среде приводит к повышению энергии волнового поля, наблюдаемого на поверхности полости напротив включения.

В заключение отметим, что полученные результаты могут быть использованы при развитии методов мониторинга состояния подземных сооружений и являются полезными при подземном способе разработки твердых полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пантелеев А. В.*, *Каспарьян Э. В.*, *Семенова И. Э.* Методика визуальных наблюдений в подземных горных выработках на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. — Апатиты: Из-во ФИЦ КНЦ РАН, 2020. — 68 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.436.5.

2. *Вербило П. Э.*, *Иовлев Г. А.*, *Петров Н. Е.*, *Павленко Г. Д.* Применение технологий информационного моделирования для маркшейдерского обеспечения ведения горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 60—79.

3. *Kang J., Li M., Mao S., Fan Y., Wu Z., Li B.* A coal mine tunnel deformation detection method using point cloud data // Sensors. 2024, vol. 24, no. 7, article 2299. DOI: 10.3390/s24072299.

4. *Camara M., Wang L., You Z.* Three-dimensional point cloud displacement analysis for tunnel deformation detection using mobile laser scanning // Applied Sciences. 2025, vol. 15, no. 2, article 625. DOI: 10.3390/app15020625.

5. *Романевич К. В.*, *Мулев С. Н.* Автоматизация классификации сейсмических событий при сейсмомониторинге угольной шахты с использованием машинного обучения // Горная промышленность. — 2023. — № S5. — С. 58—64. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-58-64.

6. *Plenkers K., Manthei G., Kwiatek G.* Underground in-situ acoustic emission in study of rock stability and earthquake physics / Acoustic Emission Testing: Basics for Research—Applications in

Engineering. — Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 403—476. DOI: 10.1007/978-3-030-67936-1_16.

7. *Wang C., Si G., Zhang C., Cao A., Canbulat I.* A statistical method to assess the data integrity and reliability of seismic monitoring systems in underground mines // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021, vol. 54, pp. 5885—5901. DOI: 10.1007/s00603-021-02597-7.

8. *Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А.* Геофизический контроль состояния подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 9. — С. 186—192.

9. *Czarny R., Malinowski M., Chamarczuk M., Ćwiękała M., Olechowski S., Isakow Z., Sierodzki P.* Dispersive seismic waves in a coal seam around the roadway in the presence of excavation damaged zone // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 148, article 104937. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104937.

10. *Chen K., Zhang Z., Zhou Y.* Application of surface wave in reinforced concrete invert detection // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 660, no. 1, article 012069. DOI: 10.1088/1755-1315/660/1/012069.

11. *Курленя М. В., Сказка В. В., Азаров А. В., Сердюков А. С., Патутин А. В.* Использование поверхностных волн для мониторинга состояния пород вокруг горных выработок и сооружений // ФТПРПИ. — 2022. — № 6. — С. 3. DOI: 10.15372/FTPRPI20220601.

12. *Staniek A.* Technical problems and non destructive testing of rock bolt support systems in mines // International Journal of Coal Science & Technology. 2023, vol. 10, no. 1, article 6. DOI: 10.1007/s40789-023-00566-9.

13. *Lyapin A., Beskopylny A., Meskhi B.* Structural monitoring of underground structures in multi-layer media by dynamic methods // Sensors. 2020, vol. 20, no. 18, article 5241. DOI: 10.3390/s20185241.

14. *Вьюнников А. А., Хоютанова Н. В., Романевич К. В., Панин С. Ф., Разумов Е. Е.* Сейсмический мониторинг и оценка геодинамических процессов при ведении горных работ в условиях подземного рудника «Интернациональный» // Горная промышленность. — 2024. — № 3S. — С. 26—31. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31.

15. *Malovichko D.* Description of seismic sources in underground mines: Theory // Bulletin of the Seismological Society of America. 2020, vol. 110, no. 5, pp. 2124—2137. DOI: 10.1785/0120200093.

16. *Гладырь А. В., Курсакин Г. А., Рассказов М. И., Константинов А. В.* Разработка метода выделения опасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустических наблюдений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 21—32.

17. *Рассказов М. И., Гладырь А. В., Терешкин А. А., Цой Д. И.* Сейсмоакустическая система контроля горного давления на подземном руднике «МИР» // Проблемы недропользования. — 2019. — № 2 (21). — С. 56—61. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.056.

18. *Мулев С. Н., Рукавишников Г. Д., Мороз Д. И., Пашкова В. И., Мороз Н. Е.* Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь» // Уголь. — 2022. — № 12 (1161). — С. 88—93. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.

19. *Шарапов И. Р., Феофилов С. А.* Наземные пассивные микросейсмические мониторинги при изучении, разработке и эксплуатации недр в нефтегазовой и горнодобывающей отраслях // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2021. — № 3. — С. 10—19.

20. *Li L., Tan J., Wood D. A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., Chen H.* A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs // Fuel. 2019, vol. 242, pp. 195—210. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.01.026.

21. *Khan M., Xueqiu H., Farid A., Jianqiang C., Honglei W., Dazhao S., Chao Z.* Geophysical characterization of mining-induced complex geological deformations in a deep coalmine // Lithosphere. 2022, vol. 2021, no. S4, article 7564984. DOI: 10.2113/2022/7564984.

22. *Hafeez M. B., Krawczuk M.* A review: Applications of the spectral finite element method // Archives of Computational Methods in Engineering. 2023, vol. 30, no. 5, pp. 3453—3465. DOI: 10.1007/s11831-023-09911-2.

23. *Komatitsch D., Tsuboi S., Tromp J., Levander A., Nolet G.* The spectral-element method in seismology // Geophysical Monograph — American Geophysical Union. 2005, vol. 157, article 205. ГИАБ

REFERENCES

1. Panteleev A. V., Kaspar'yan E. V., Semenova I. E. *Metodika vizual'nykh nablyudeniy v podzemnykh gornykh vyrabotkakh na mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram* [Methods

of visual observations in underground mine workings at deposits, prone and dangerous for mountain strikes], Apatity, 2020, 68 p. DOI: 10.37614/978.5.91137.436.5.

2. Verbilo P. E., Iovlev G. A., Petrov N. E., Pavlenko G. D. Application of information modeling technologies for surveying support of mining operations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 60—79. [In Russ].

3. Kang J., Li M., Mao S., Fan Y., Wu Z., Li B. A coal mine tunnel deformation detection method using point cloud data. *Sensors*. 2024, vol. 24, no. 7, article 2299. DOI: 10.3390/s24072299.

4. Camara M., Wang L., You Z. Three-dimensional point cloud displacement analysis for tunnel deformation detection using mobile laser scanning. *Applied Sciences*. 2025, vol. 15, no. 2, article 625. DOI: 10.3390/app15020625.

5. Romanevich K. V. Long-term monitoring of underground structures using the EEMI (EEMPZ) method. Problems and prospects of integrated development and conservation of land. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. S5, pp. 58—64. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-58-64.

6. Plenkers K., Manthei G., Kwiatek G. Underground in-situ acoustic emission in study of rock stability and earthquake physics. *Acoustic Emission Testing: Basics for Research—Applications in Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 403—476. DOI: 10.1007/978-3-030-67936-1_16.

7. Wang C., Si G., Zhang C., Cao A., Canbulat I. A statistical method to assess the data integrity and reliability of seismic monitoring systems in underground mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, pp. 5885—5901. DOI: 10.1007/s00603-021-02597-7.

8. Abramov N. N., Epimakhov Yu. A. Geophysical monitoring of the state of underground structures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 9, pp. 186—192. [In Russ].

9. Czarny R., Malinowski M., Chamarczuk M., Ćwiękała M., Olechowski S., Isakow Z., Sierodzki P. Dispersive seismic waves in a coal seam around the roadway in the presence of excavation damaged zone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 148, article 104937. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104937.

10. Chen K., Zhang Z., Zhou Y. Application of surface wave in reinforced concrete invert detection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 660, no. 1, article 012069. DOI: 10.1088/1755-1315/660/1/012069.

11. Kurlenya M. V., Skazka V. V., Azarov A. V., Serdyukov A. S., Patutin A. V. Using surface waves for monitoring rock mass condition around underground openings and structures. *Journal of Mining Sciences*. 2022, no. 6, pp. 3. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220601.

12. Staniek A. Technical problems and non destructive testing of rock bolt support systems in mines. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2023, vol. 10, no. 1, article 6. DOI: 10.1007/s40789-023-00566-9.

13. Lyapin A., Beskopylny A., Meskhi B. Structural monitoring of underground structures in multilayer media by dynamic methods. *Sensors*. 2020, vol. 20, no. 18, article 5241. DOI: 10.3390/s20185241.

14. Vyunnikov A. A., Khoyutanova N. V., Romanevich K. V., Panin S. F., Razumov E. E. Seismic monitoring and assessment of geodynamic processes during mining operations at the Internatsionalny underground mine. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 3S, pp. 26—31. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31.

15. Malovichko D. Description of seismic sources in underground mines: Theory. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2020, vol. 110, no. 5, pp. 2124—2137. DOI: 10.1785/0120200093.

16. Gladyr A. V., Kursakin G. A., Rasskazov M. I., Konstantinov A. V. Method to detect hazardous areas in rock mass from seismoacoustic observations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 21—32. [In Russ].

17. Rasskazov M. I., Gladyr A. V., Tereshkin A. A., Tsoi D. I. Seismoacoustic rock pressure control system at the MIR underground mine. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 2 (21), pp. 56—61. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.056.

18. Mulev S. N., Rukavishnikov G. D., Moroz D. I., Pashkova V. I., Moroz N. E. Monitoring of the stress state by seismic and calculation methods at the mines of JSC Vorkutaugol. *Ugol'*. 2022, no. 12 (1161), pp. 88—93. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.

19. Sharapov I. R., Feofilov S. A. Ground passive microseismic monitoring in the study, development and operation of subsoil in the oil and gas and mining industries. *Devices and systems of Exploration Geophysics*. 2021, no. 3, pp. 10—19. [In Russ].

20. Li L., Tan J., Wood D. A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., Chen H. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs. *Fuel*. 2019, vol. 242, pp. 195 — 210. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.01.026.

21. Khan M., Xueqiu H., Farid A., Jianqiang C., Honglei W., Dazhao S., Chao Z. Geophysical characterization of mining-induced complex geological deformations in a deep coalmine. *Lithosphere*. 2022, vol. 2021, no. S4, article 7564984. DOI: 10.2113/2022/7564984.

22. Hafeez M. B., Krawczuk M. A review: Applications of the spectral finite element method. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023, vol. 30, no. 5, pp. 3453 — 3465. DOI: 10.1007/s11831-023-09911-2.

23. Komatitsch D., Tsuboi S., Tromp J., Levander A., Nolet G. The spectral-element method in seismology. *Geophysical Monograph — American Geophysical Union*. 2005, vol. 157, article 205.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Азаров Антон Витальевич[1] — канд. техн. наук,
инженер, e-mail: antonazv@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6967-4239,
Сердюков Александр Сергеевич[1] — канд. физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru,
ORCID ID: 0000-0035-8563-5708,
Сказка Валерий Всеволодович[2] — д-р физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: vskazka@gmail.com,
Сердюк Иннокентий Михайлович[2] — инженер-исследователь,
e-mail:ken04588@gmail.com,
[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения РАН,
[2] Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН.
Для контактов: Азаров А.В., e-mail: antonazv@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Azarov[1], Cand. Sci. (Eng.), Engineer,
e-mail: antonazv@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6967-4239,
A.S. Serdyukov[1], Cand. Sci. (Phys. Mathem.),
Senior Researcher, e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru,
ORCID ID: 0000-0035-8563-5708,
V.V. Skazka[2], Dr. Sci. (Phys. Mathem.),
Leading Researcher, e-mail: vskazka@gmail.com,
I.M. Serdyuk[2], Research Engineer,
e-mail:ken04588@gmail.com,
[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia,
[2] Institute of Mining N.A. Chinakala of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.
Corresponding author: A.V. Azarov, e-mail: antonazv@mail.ru.

Получена редакцией 20.06.2025; получена после рецензии 13.10.2025; принята к печати 10.01.2026.
Received by the editors 20.06.2025; received after the review 13.10.2025; accepted for printing 10.01.2026.