

ВЫБОР ИСТОЧНИКА УПРУГИХ ВОЛН В ЗАДАЧЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА СЕЙСМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Н. Г. Валиев¹, И. В. Шнайдер¹, М. И. Абдрахманов¹, В. И. Самсонов¹, А. Э. Зудилин¹

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Аннотация: Изучение состояния углепородных массивов при их механизированной обработке является важной задачей для обеспечения безопасности и эффективности добычи полезных ископаемых. Одним из методов неразрушающего контроля состояния горного массива является сейсмическое зондирование, которое основано на регистрации отраженных упругих волн, возникающих при воздействии технологического оборудования на горный массив. Для эффективного использования этого метода в режиме мониторинга необходимо выбрать источник упругих волн с учетом ряда условий, включая максимальную энергетическую эффективность и технологичность. Выбор источника упругих волн предлагается заполнить по ряду критериев, несоответствие которым является условием отнесения источника колебаний к помехам. В данной статье решается задача выбора техногенного источника упругих волн для мониторинга состояния углепородного массива сейсмическим методом. В основу статьи положен эксперимент, в ходе которого были получены данные о спектрах сигналов, изменении амплитуды и местоположения источника. На основе выбранных критериев был сделан обоснованный выбор источника упругих волн для дальнейшего применения в задаче мониторинга горного массива. Предлагаемый способ может также использоваться при выборе и оценке характеристик источников упругих волн в подготовительных забоях шахт и рудников, ведущих работы механизированным способом.

Ключевые слова: Сейсмозондирование, угольная шахта, источник упругих волн, мониторинг массива пород, Микон-ГЕО, шахтная сейсмозащита, сейсмический метод, спектр техногенного источника.

Для цитирования: Валиев Н. Г., Шнайдер И. В., Абдрахманов М. И., Самсонов В. И., Зудилин А. Э. Выбор источника упругих волн в задаче мониторинга состояния углепородного массива сейсмическим методом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1-1. – С. 179–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_179.

Selection of the elastic wave source in the problem of monitoring the state of a carbonate massif using the seismic method

N. G. Valiev¹, I. V. Shnaider¹, M. I. Abdrakhmanov¹, V. I. Samsonov¹, A. E. Zudilin¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: ivan-shnajder@yandex.ru

Abstract: Studying the state of coal-rock masses during their mechanized mining is an important task to ensure safety and efficiency in the extraction of mineral resources. Seismic probing is one of the non-destructive methods for monitoring the state of a rock mass, which is based on registering elastic waves that arise when technological equipment acts on a rock mass.

To effectively use this method for monitoring, it is necessary to choose an optimal source of elastic waves taking into account several conditions, including maximum energy efficiency and technological feasibility. The selection of the source of elastic waves is proposed to be performed based on a set of criteria, the deviation from which serves as a condition for classifying the vibration source as interference. This article describes a method for selecting a source of elastic waves in monitoring the state of coal-rock masses using the seismic method. The article is based on an experiment that generated data on signal spectra, amplitude changes, and source location. Based on selected optimality criteria, a reasonable choice was made for the source of elastic waves for further use in monitoring the rock mass. The proposed method can be used in selecting and evaluating the characteristics of sources of elastic waves in preparatory workings of mines and mines that use mechanized mining techniques.

Key words: Seismic probing, coal mine, source of elastic waves, rock mass monitoring.

For citation: Valiev N. G., Shnaider I. V., Abdrakhmanov M. I., Samsonov V. I., Zudilin A. E. Selection of the elastic wave source in the problem of monitoring the state of a carbonate massif using the seismic method. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):179–192. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_179.

Введение

Отработка пологих угольных пластов механизированным способом представляет собой технологический процесс, характеризующийся нарушением равновесного напряженно-деформированного состояния углепородного массива с высокой степенью интенсивности [1]. В результате такого техногенного воздействия происходит неконтролируемое перераспределение напряжений, зачастую приводящее к динамическим проявлениям горного давления [2], потере устойчивости приконтурной области выемочного столба и другим опасным последствиям.

Автоматический непрерывный метод неразрушающего контроля состояния горного массива на основе сейсмического зондирования может стать дополнением к существующим инструментальным способам контроля, что в условиях существенно возросших темпов ведения подземных работ может позволить выполнять оперативную оценку рисков возникновения опасных явлений [3]. Этот метод основан на регистрации упругих волн, которые возникают при воздействии технологического оборудования на горный массив и, отражаясь от неоднородно-

стей, несут информацию об их местоположении и геометрических размерах.

Для эффективного использования сейсмического метода [4] в режиме мониторинга [5] необходимо выбрать источник упругих волн в соответствии с рядом критериев. В данной работе предложен набор критериев и рассмотрен способ выбора источников упругих волн на основе экспериментально полученных в угледобывающем забое данных.

Критерии выбора источника упругих волн

Зададимся критериями выбора источника возбуждения упругих волн для возможности наблюдения за состоянием горного массива в режиме мониторинга (т.е. условно-непрерывно):

- мощность воздействия источника на горный массив достаточна для регистрации пакета отраженных волн от объектов во всей области исследования;
- частотный диапазон упругих волн, возбуждаемых источником колебаний в данном типе горного массива, лежит внутри частотного диапазона сейсмоприемников;
- местоположение источника в пространстве в момент воздействия

на горный массив известно или возможно определить;

– источник является частью технологического процесса и работает максимальное количество времени в течение суток.

Обзор возможных источников упругих волн

Основными источниками сейсмоакустических колебаний [6] в добычных участках являются рабочий орган комбайна и скребковый конвейер, расположенный в очистной выработке. Остальные источники можно отнести к источникам помех, так как они воздействуют на горный массив с недостаточной энергией, большинство из них воздействуют несистемно и расположены на различном удалении от груди забоя.

К источникам колебаний в вентиляционном штреке относятся:

– сборная система энергоснабжения (энергопоезд), расположенная на расстоянии от нескольких метров до 100 метров от сопряжения с очистной выработкой и передвигаемая по мере отработки выемочного столба лавы;

– станция, нагнетающая эмульсию в стойки механизированной крепи, передвигаемая с системой энергоснабжения;

– устройства громкоговорящей связи и сигнализации.

К источникам колебаний в конвейерном штреке относятся:

– скребковый перегружатель;

– дробилка;

– магистральный ленточный конвейер;

– устройства громкоговорящей связи и сигнализации.

Комбайн и скребковый конвейер являются наиболее подходящими по местоположению и времени работы в течение суток.

Возбуждение упругих волн импульсным источником считается эталонным в сейсморазведке [7]. Комбайн и скребковый конвейер можно отнести к вибрационным источникам. Записанные в этом случае виброграммы преобразуют в импульсный вид, и к ним применяют стандартные способы обработки сейсмоданных.

Постановка эксперимента

Целью эксперимента является исследование различных источников упругих волн в очистном забое угольной шахты и оценка их применимости на основе указанных выше критериев.

В качестве объекта исследования был выбран участок угольного пласта шахты в зоне производства очистных работ [8]. Угольный пласт на момент проведения эксперимента имел мощность 1,5 м. Непосредственная кровля сложена алевролитами мелкозернистыми, темно-серыми. Основная кровля представлена песчаниками мелкозернистыми. Почва пласта сложена алевролитами мелкозернистыми слабопучащими серыми с косой и горизонтальной слоистостью. Для отработки запасов пласта используется механизированный комплекс производства в составе: механизированная крепь, очистной комбайн, лавный скребковый конвейер, штрековый перегружатель, дробилка и насосная станция.

Регистрация сейсмических сигналов осуществлялась средствами аппаратно-программного комплекса «Микон-ГЕО» (производство ООО «Ингортех», г. Екатеринбург) [9]. Комплект регистрирующей аппаратуры состоял из восьми трехкомпонентных цифровых сейсмоприемников ИПСМ2, регистрирующих в частотном диапазоне 0–1532 Гц, включающих вертикальный и два горизонтальных геофона типа GMT-12,5H и GMT-12,5V, соответ-

ственно, собственная частота которых составляет 12 Гц.

Сейсмоприемники в количестве 8 штук были установлены в шпуров глубиной 0,5 м, пробуренные в борту вентиляционного штрека на высоте 1–1,5 м от уровня почвы, на расстоянии 5 м друг относительно друга и с таким же отступом от груди забоя (рис. 1).

Перед установкой в горный массив сейсмоприемники были проверены встроенными средствами автоматического тестирования, заложеными производителем аппаратуры, и прошли проверку на идентичность записи: все 8 сейсмоприемников были разложены на почве в непосредственной близости друг от друга, импульсное воздействие (в нашем случае — удар кувалдой) выполнялось по почве на удалении 10 м. Вывод об идентичности регистрирующих каналов был сделан методом визуальной оценки формы записанных сейсмограмм, отображаемых на дисплее искробезопасного планшета по всем 24 регистрирующим каналам. В период проведения проверок техно-

логические шумы были минимизированы, насколько это представлялось возможным: энергоснабжающее оборудование было обесточено, ремонтные работы, выполняемые персоналом шахты, приостановлены. Внешнее сейсмоакустическое воздействие, оказываемое потоками нагнетаемого воздуха и деятельностью персонала шахты на соседних участках, внесло помеху, незначительно повысившую уровень собственных шумов регистрирующей аппаратуры.

Установка сейсмоприемников в шпуров выполнялась сразу после бурения, а прижимная рессора, компенсирующая различия диаметров, обеспечила надежный контакт датчиков с горным массивом.

Регистрация сейсмоакустической активности выполнялась в два этапа. На первом этапе технологическое оборудование было отключено, а воздействие на горный массив выполнялось импульсным источником (кувалда) в пункте возбуждения, расположенном на груди забоя, на расстоянии 5 метров от сопряжения с вентиляционным

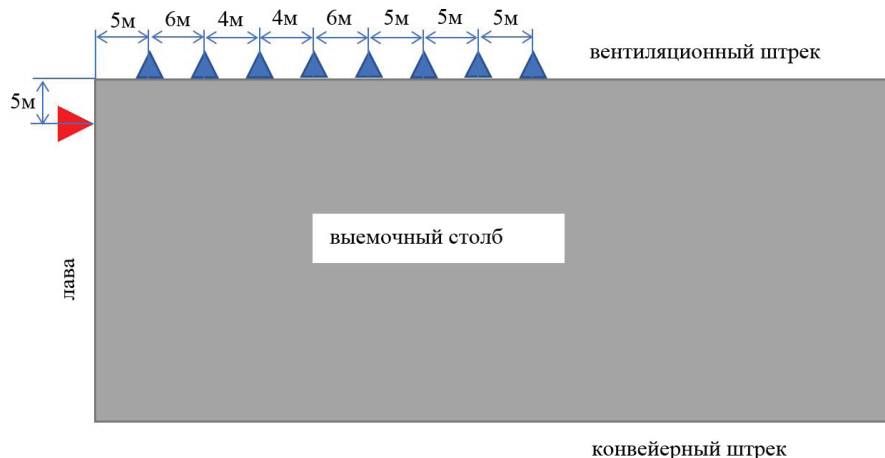


Рис. 1. Схема расположения сейсмоприемников и пунктов возбуждения упругих волн в горном массиве (треугольники синего цвета — сейсмоприемники, красного — пункт возбуждения)

Fig. 1. Layout diagram of seismic sensors and points of excitation of elastic waves in a mountain range (blue triangles represent seismic sensors, red ones — points of excitation)

штреком, в борт которого были установлены сейсмоприемники (см. рис. 1). На втором этапе, при той же расстановке сейсмоприемников, воздействие на горный массив выполнялось ротором комбайна и скребковым конвейером или только скребковым конвейером, когда комбайн уезжал к конвейерному штреку, т.е. находился от сопряжения с вентиляционным штреком на расстоянии около 180 метров.

С учетом имеющейся расстановки регистрирующей аппаратуры (базы приема), составляющей 40 метров, обозначим зону исследования в виде квадрата 40 на 40 метров. Мощность воздействия источника будем считать достаточной, если дальний от источника сейсмоприемник регистрирует сигнал прямой (проходящей) волны и соотношение сигнал/шум составляет 8/1, что обеспечит гарантированный прием сигналов отраженных волн на той же дистанции.

Местоположение источника в момент возбуждения упругих волн является одним из определяющих факторов при обработке сейсмоданных методом отраженных волн, применяемым в текущей реализации системы «Микон-ГЕО». С учетом средней скорости прохождения упругой волны в горном массиве (для данных условий она была измерена и равна 1300 м/с) при ошибке определения местоположения источника в 10 метров, ошибка определения положения объекта риска составляет приблизительно 4 метра. Такая ошибка соизмерима с размерами горных выработок, а это является неприемлемым.

Мониторинг состояния горного массива [10] по данным искусственной акустической эмиссии предполагает обработку сигналов отраженных волн только во время воздействия технологического оборудования на горный

массив. Если источник не воздействует на горный массив, то мониторинг не выполняется и состояние исследуемой области не определено.

Обработка результатов эксперимента

Для оценки возможности применения комбайна и скребкового конвейера в качестве источников упругих волн [11] по выбранным критериям сравним амплитудно-частотные спектры сигналов, зарегистрированных от импульсного источника — кувалды, как эталонного, и вибрационных — комбайна и скребкового конвейера [12].

К рассмотрению примем спектры сигналов, зарегистрированных геофоном, максимальная ось чувствительности которого параллельна борту горной выработки и указывает на источник колебаний [13], расположенный на груди забоя.

Для сопоставления рассмотрим спектры сигналов, записанных сейсмоприемниками [14], в режиме тишины (под тишиной следует понимать отсутствие сейсмоакустических сигналов, возникающих при работе механизмов и других воздействиях на горный массив, регистрируемых сейсмоприемниками), лежащими на почве (рис. 2) и установленными в шпур (рис. 3), пробуренные в борт вентиляционного штрека, согласно схеме, приведенной на рис. 1.

Из спектров [15], представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что при недостаточном контакте сейсмоприемника с горным массивом в большей мере осуществляется регистрация акустических шумов в диапазоне частот 70–220 Гц и максимальными значениями амплитуд на уровне 8500 единиц всеми сейсмоприемниками. Амплитуды сигналов, зарегистрированных сейсмоприемниками, установлен-

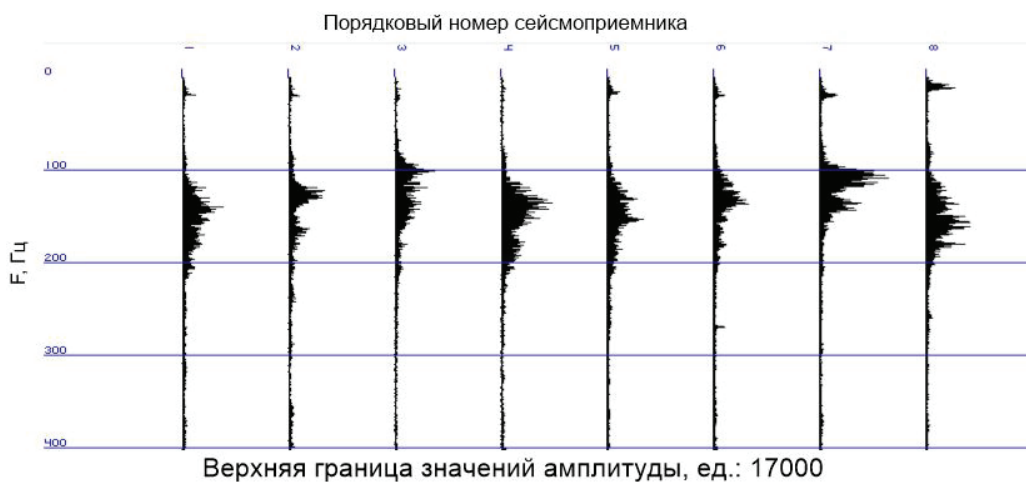


Рис. 2. Спектры сигналов, зарегистрированных сейсмоприемниками, лежащими на почве, в режиме тишины

Fig. 2. Spectra of signals recorded by seismic sensors located on the ground in quiet mode

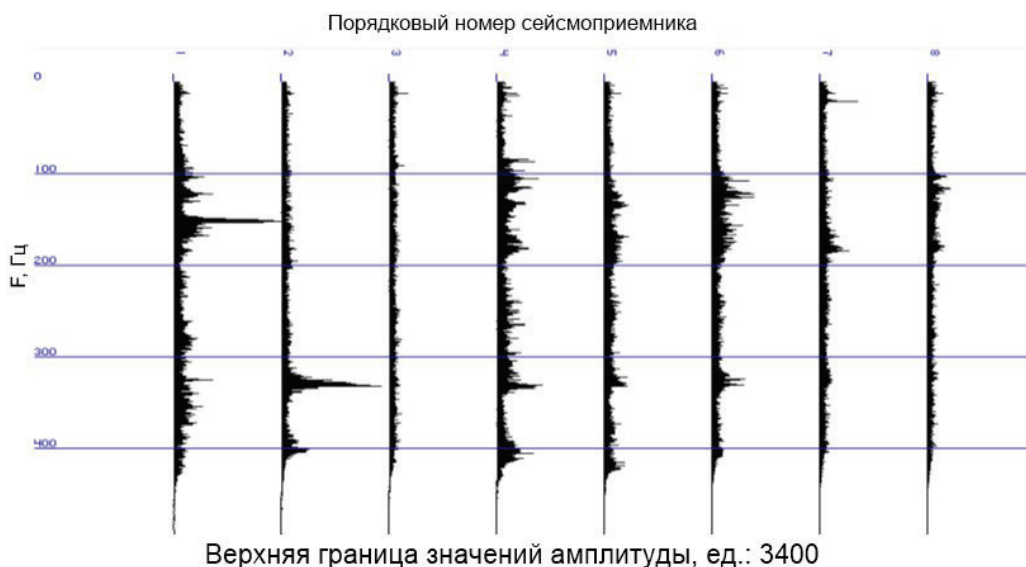


Рис. 3. Спектры сигналов, зарегистрированных сейсмоприемниками, установленными в шпур, в режиме тишины

Fig. 3. Spectra of signals recorded by seismic sensors installed in boreholes in quiet mode

ными в шпур, в среднем находятся на уровне 1000 единиц в частотном диапазоне 20–420 Гц. Примем уровень амплитуд в 1000 единиц за сумму регулярных внешних помех и собственные

шумы аппарата в текущих условиях применения.

Представленные далее спектры сигналов получены в результате регистрации теми же сейсмоприемниками, разме-

щенными в шпурах, согласно схеме (см. рис. 1). Сейсмоприемники в ходе эксперимента не вынимались из шпуров.

Рассмотрим спектр сигнала (рис. 4), зарегистрированного при импульсном воздействии на горный массив кувалдой в пункте возбуждения, размещенном на груди забоя.

Отметим, что удар кувалдой возбуждает пакет волн, максимальный уровень энергии которых лежит в диапазоне частот 50–420 Гц, амплитуда снижается по мере удаления от источника, что позволяет определить направление прихода фронта волны, а максимальные значения амплитуд вырастают до уровня 130 000 единиц, т.е. на два порядка превышают значения амплитуд сигналов в режиме тишины, когда сейсмоприемники были расставлены в борт вентиляционного штрека. Сравнив уровень амплитуд, принятый за собственные шумы (1000 ед.), с уровнем амплитуд сигнала, зарегистрированного даль-

ним от источника сейсмоприемником (16000 ед.), можно сделать вывод, что соотношение сигнал/шум является удовлетворительным и равно 16/1, то есть кувалда соответствует требованию, предъявляемому к мощности источника упругих колебаний.

Для дальнейшего сравнения не будет рассматриваться вариант, когда сейсмоприемники лежали на почве, так как эта операция была частью процедуры проверки работоспособности регистрирующей аппаратуры и такое размещение сейсмоприемников недопустимо в задачах регистрации сейсмических сигналов [16].

Спектр сигнала, регистрируемого при работе скребкового конвейера в момент времени, когда добычной комбайн находился на расстоянии около 180 м от места установки регистрирующей аппаратуры, приведен на рис. 5. В этом случае можно допустить, что комбайн не является источником в данный момент времени.

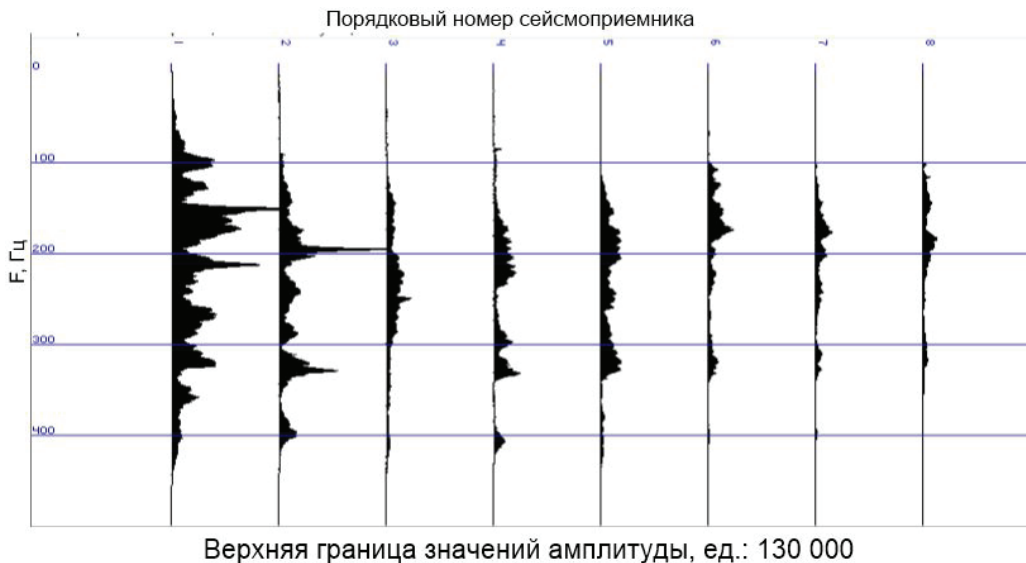


Рис. 4. Спектры сигналов, зарегистрированных сейсмоприемниками при ударе кувалдой в грудь забоя

Fig. 4. Spectra of signals recorded by seismic sensors during a hammer blow to the chest of the bench

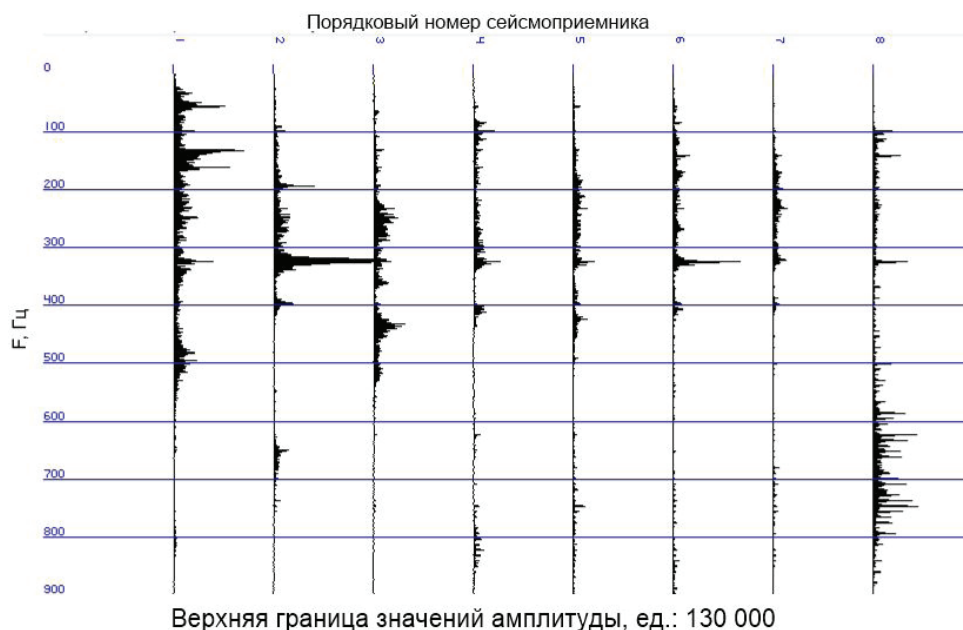


Рис. 5. Спектры сигналов, зарегистрированных сейсмоприемниками при работе скребкового конвейера
 Fig. 5. Spectra of signals recorded by seismic sensors during the operation of a scraper conveyor

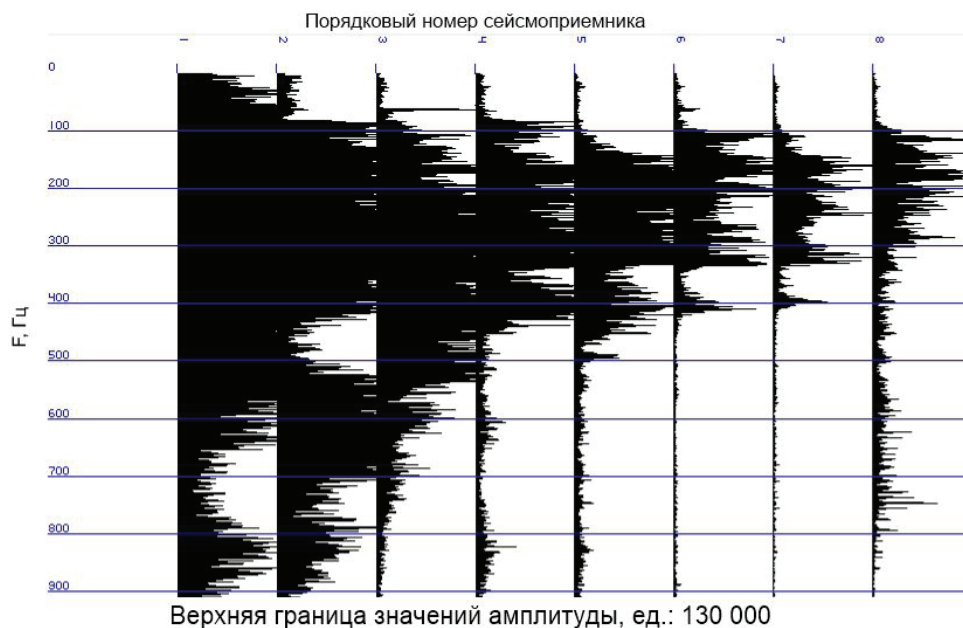


Рис. 6. Спектры сигналов, зарегистрированных сейсмоприемниками при работе комбайна в непосредственной близости от сейсмоприемников с верхней границей значений амплитуды 130 000 ед.
 Fig. 6. Spectra of signals recorded by seismic sensors during the operation of a combine harvester in close proximity to the sensors with an upper limit of amplitude values of 130,000 units

Сравнив характеристики сигналов [17], зарегистрированных при ударе кувалды и работе скребкового конвейера, отметим следующее:

- энергия упругих колебаний скребкового конвейера имеет тот же порядок, что и удар кувалды;

- в случае работы скребкового конвейера появилась энергия в частотном диапазоне 420–900 Гц;

- спектр сигнала скребкового конвейера приобрел пики в один дискрет, что свидетельствует о наличии гармонических колебаний;

- высокочастотная составляющая спектра сигнала скребкового конвейера, зарегистрированного дальними от забоя датчиками, говорит о наличии помех, которые можно связать с работой энергопоезда, снабжающего устройства и механизмы электроэнергией, и насосов, размещенных на энергопоезде, нагнетающих эмульсию в стойки механизированной крепи.

Соотношение сигнал/шум [18] при работе скребкового конвейера, оцениваемое по дальнему от источника сейсмоприемнику, равно 10/1, то есть скребковый конвейер также удовлетворяет требованию, предъявляемому к мощности источника упругих колебаний.

Спектры сигналов, зарегистрированных при воздействии ротора очистного комбайна на угольный пласт в непосредственной близости от сопряжения с вентиляционным штреком, при работе скребкового конвейера, в разных масштабах амплитуд приведены на рис. 6 и 7.

Анализ спектров сигналов [19], зарегистрированных при добыче угля комбайном в непосредственной близости от сейсмоприемников, позволил сделать следующие выводы:

- уровень энергии упругих волн, возбуждаемых комбайном, превосхо-

дит скребковый конвейер и кувалду на порядок;

- предположение об энергопоезде и насосе как источнике помех подтверждается наличием в спектре сигнала комбайна гармонических колебаний на тех же частотах и примерно того же уровня амплитуд, что и при работе скребкового конвейера (см. правый нижний угол рис. 5 и 6).

Диапазон частот [20] преобладающих колебаний во всех трех случаях укладывается в диапазон регистрации сейсмоприемников 12,5–1500 Гц.

Соотношение сигнал/шум при работе комбайна в непосредственной близости от сейсмоприемников, оцениваемое по дальнему от источника сейсмоприемнику, равно 65/1, следовательно, кувалда, скребковый конвейер и комбайн, работающий в непосредственной близости от сейсмоприемников, удовлетворяют требованиям к мощности источника.

Перейдем к анализу времени работы механизмов, предварительно рассматриваемых в качестве источников, а именно скребкового конвейера и добычного комбайна. Исходя из правил транспортировки угля на поверхность, комбайн может работать только при условии работы скребкового конвейера. На рис. 8 приведен график положения комбайна и график амплитуд сигналов, зарегистрированных ближним к груди забоя сейсмоприемником, где цифрой 1 обозначен период, когда скребковый конвейер и комбайн были отключены, 2 — комбайн и скребковый конвейер включены и ведется добыча с переменным воздействием на горный массив, 3 — комбайн и скребковый конвейер включены и комбайн расположен в непосредственной близости к регистрирующей аппаратуре, 4 — комбайн на максимальном удалении, скребковый конвейер включен. Стойка

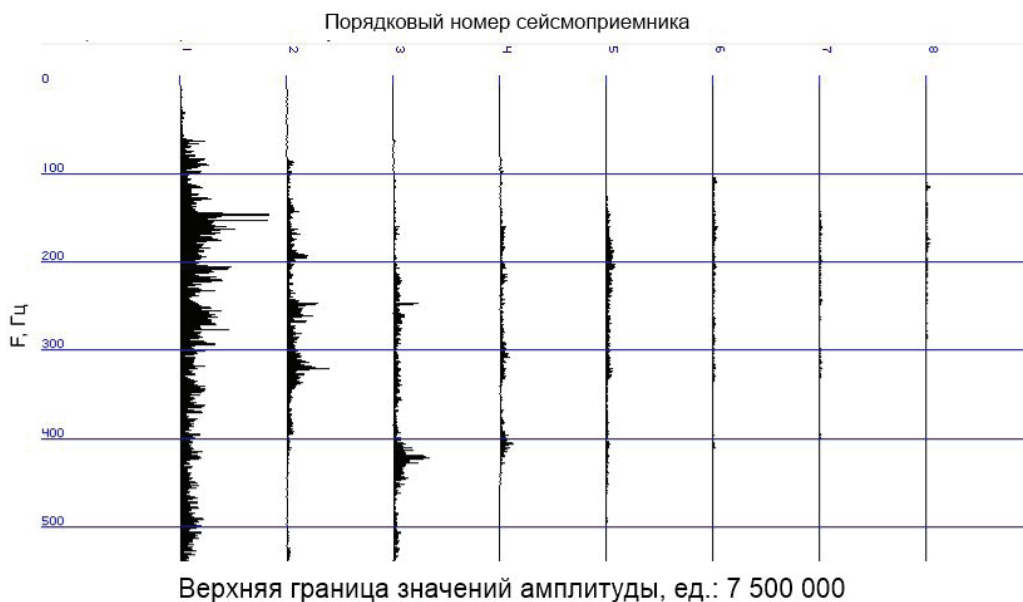


Рис. 7. Спектры сигналов, зарегистрированных сейсмоприемниками при работе комбайна в непосредственной близости от сейсмоприемников с верхней границей значений амплитуды 7 500 000 ед.

Fig. 7. Spectra of signals recorded by seismic sensors during the operation of a combine harvester in close proximity to the sensors with an upper limit of amplitude values of 7,500,000 units

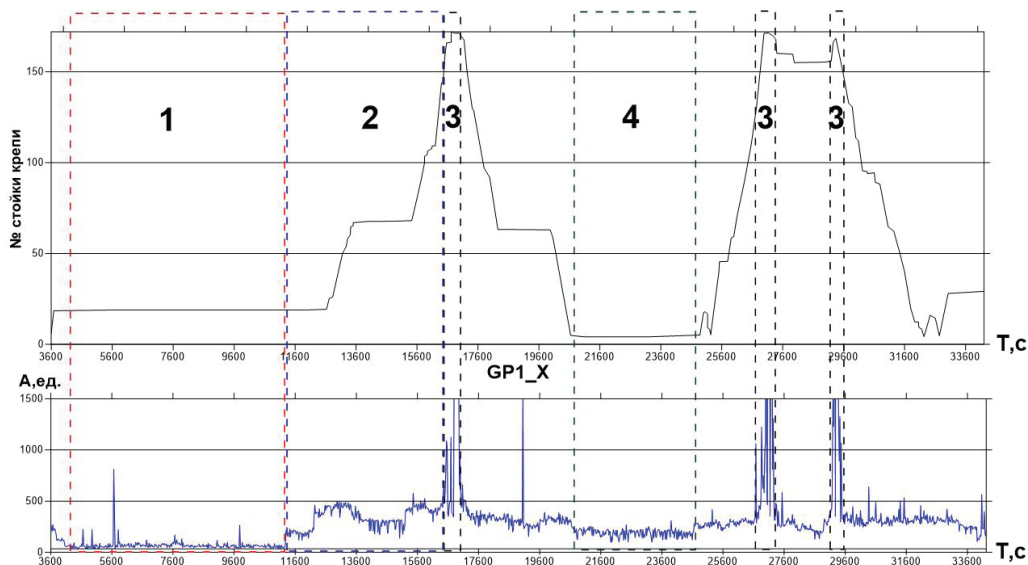


Рис. 8. График движения комбайна и амплитуд сигналов, зарегистрированных ближним к груди забоя сейсмоприемником

Fig. 8. Graph of the movement of the combine and the amplitudes of signals registered by the seismic sensor located close to the face

крепи № 0 расположена на конвейерном штреке, а № 170 — на вентиляционном.

Из графиков на рис. 8 видно, что по уровню амплитуд сигналов можно различать несколько ключевых состояний:

- скребковый конвейер и комбайн отключены;

- скребковый конвейер и комбайн в работе, комбайн около сейсмоприемников;

- скребковый конвейер и комбайн в работе, комбайн находится далеко от сейсмоприемников;

- скребковый конвейер и комбайн в работе, комбайн на средней дистанции от сейсмоприемников.

Наблюдения за местоположением комбайна в течение суток на рассматриваемом в настоящей статье участке и на других очистных забоях позволяют примерно оценить количество и время нахождения комбайна в непосредственной близости около сейсмоприемников, что является определяющим условием комбайна как источника. В среднем комбайн приближается 4–6 раз в сутки и находится в допустимом интервале (10 м от сопряжения со штреком) около 1 часа, т.е. 4–6 часов в сутки. Следовательно, применение комбайна в качестве единственного источника для выполнения мониторинга состояния горного массива является недостаточным. Скребковый конвейер работает в среднем около 15 часов в сутки.

Подведем итог, воспользовавшись выбранными критериями:

- мощность воздействия скребкового конвейера и ротора добычного комбайна на горный массив превос-

ходит соотношение сигнал/шум 8/1 и, следовательно, в обоих случаях является достаточной для регистрации пакета отраженных волн от объектов области исследования 40x40 м;

- частотный диапазон упругих волн, возбуждаемых предполагаемыми источниками колебаний в данном типе горного массива, составляет 20–920 Гц и лежит внутри частотного диапазона сейсмоприемников 12,5–1500 Гц;

- местоположение скребкового конвейера в пространстве в момент воздействия на горный массив постоянно и известно, а в случае комбайна может быть определено методом селекции сейсмограмм по уровню амплитуд;

- для обеспечения наличия данных о состоянии горного массива необходимо применение скребкового конвейера и комбайна в качестве источников упругих волн в режиме селекции сейсмограмм по уровню амплитуд. Оба источника являются частью технологического процесса и работают в среднем около 15 часов в сутки.

Вывод

С учетом описанных особенностей работы скребкового конвейера и добычного комбайна, а также фильтрации помех в высокочастотной области спектра, соизмеримых с уровнем полезного сигнала, можно сделать вывод о применимости лавного скребкового конвейера и ротора добычного комбайна в качестве источников упругих волн в задаче мониторинга состояния углепородного массива сейсмическим методом. Аналогичным образом может быть произведен выбор источника упругих волн в условиях подготовительного участка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаров В. Н., Шляпин А. В., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А.* Изменение напряженно-деформированного состояния углепородного массива при отработке угольного

пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 9. — С. 5–24. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-5-24.

2. *Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н.* Прогноз потенциальной удароопасности нижних горизонтов Холбинского рудника // Известия вузов. Горный журнал. — 2019. — № 8. — С. 30–37. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37.

3. *Абдрахманов М. И., Лапин С. Э., Шнайдер И. В.* Создание цифровой модели структуры выемочного столба лавы методом сейсмозондирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11–2. — С. 148–158. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_148.

4. *Егоров А. П., Рыжов В. А.* К вопросу систематизации геофизических исследований геомеханического состояния массива горных пород и земной поверхности для оперативного контроля безопасного ведения горных работ на угольных шахтах // Уголь. — 2019. — № 10. — С. 29–33.

5. *Анциферов А. В., Глухов А. А., Анциферов В. А.* Шахтный сейсмический прогноз тектонических нарушений по отраженным волнам методом локации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 131–139. DOI: 10.25018/02361493-2020-6-0-131-139.

6. *Oboué Y. A. S. I., Chen W., Saad O. M. et al.* Adaptive Damped Rank-Reduction Method for Random Noise Attenuation of Three-Dimensional Seismic Data // *Surv Geophys.* 2023, vol. 44, pp. 847–875. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09756-7>.

7. *Arrowsmith S. J., Trugman D. T., MacCarthy J., Bergen K. J., Lumley D., Magnani M. B.* Big Data Seismology // *Reviews of Geophysics.* 2022, vol. 60, issue 2. DOI: 10.1029/2021RG000769.

8. *Соколов С. В., Салтымаков Е. А., Кормин А. Н.* Комплексные геофизические исследования состояния углепородного массива в условиях Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2017. — № 2. — С. 66–70.

9. *Писецкий В. Б., Robert Huang, Патрушев Ю. В., Зудилин А. Э., Шнайдер И. ., Ширококов М. П.* Результаты испытаний сейсмических систем контроля состояния устойчивости горного массива в процессах строительства автодорожных тоннелей в Китае // Добывающая промышленность. — 2017. — № 2 (06). — С. 108.

10. *Романов В. В., Мальский К. С., Посеренин А. И., Каринский А. Д.* Оценка устойчивости и обводненности породного массива геофизическими методами // Горный журнал. — 2018. — № 11. — С. 61–64. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.11.

11. *Liu W., Liu Y., Li S. et al.* A Review of Variational Mode Decomposition in Seismic Data Analysis // *Surv Geophys.* 2023, vol. 44, pp. 323–355. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09742-z>.

12. *Разумов Е. Е., Простов С. М.* Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 8–12.

13. *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 .

14. *Астраханцев Ю. Г., Баженова Е. А., Белоглазова Н. А., Вдовин А. Г., Глухих И. И., Иванченко В. С., Хачай О. А.* Комплексные геофизические исследования массивов горных пород в естественном залегании. — Екатеринбург: УрО РАН, 2018. — 105 с.

15. *Wang Z., Sun C. & Wu D.* Near-surface Site Characterization Based on Joint Iterative Analysis of First-arrival and Surface-wave Data // *Surv Geophys.* 2023, vol. 44, pp. 357–386. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09747-8>.

16. *Wu B., Hu H. & Zhou H. W.* Convolutional Neural Network-Assisted Least-Squares Migration // *Surv Geophys.* 2023, vol. 44(6), pp. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09777-w>.

17. *Verdon J. P., Kendall J. M., Butcher A., Luckett R., Baptie B. J.* Seismicity induced by longwall coal mining at the Thoresby Colliery, Nottinghamshire, UK // *Geophysical Journal International.* 2018, vol. 212, no. 2, pp. 942–954.

18. Харисов Т. Ф., Мельник В. В., Замятин А. Л. Геофизические поисково-оценочные исследования в условиях подземного рудника // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 7. — С. 49–55. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-49-55.
19. Давыдов В. А. Спектральный анализ данных микросейсмических зондирований // Геофизика. — 2015. — № 1. — С. 72–77.
20. Шаранов 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. [ПДФ](#)

REFERENCES

1. Zakharov V. N., Shlyapin A. V., Trofimov V. A., Filippov Yu. A. Change in stress-strain behavior of coal-rock mass during coal mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 5–24. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-5-24.
2. Sosnovskaya E. L., Avdeev A. N. Prediction of the potential rockburst hazard of the lower levels of the Kholbinsky mine. *Izvestiya Vuzov. Mining Journal.* 2019, no. 8, pp. 30–37. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37.
3. Abdrakhmanov M. I., Lapin S. E., Shnaider I. V. Creation of a digital model of extraction pillar by the reflection seismic surveying method. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11–2, pp. 148–158. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_112_0_148.
4. Egorov A. P., Ryzhov V. A. On the issue of systematization of geophysical studies of the geomechanical state of the rock mass and the earth's surface for operational control of safe mining operations at coal mines. *Ugol'*. 2019, no. 10, pp. 29–33. [In Russ].
5. Antsiferov A. V., Glukhov A. A., Antsiferov V. A. Mine seismic prediction of tectonic faults by reflected waves using the method of location. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6, pp. 131–139. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-131-139.
6. Oboué Y. A. S. I., Chen W., Saad O. M. et al. Adaptive Damped Rank-Reduction Method for Random Noise Attenuation of Three-Dimensional Seismic Data. *Surv Geophys.* 2023, vol. 44, pp. 847–875. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09756-7>.
7. Arrowsmith S. J., Trugman D. T., MacCarthy J., Bergen K. J., Lumley D., Magnani M. B. Big Data Seismology. *Reviews of Geophysics.* 2022, vol. 60, issue 2. DOI: 10.1029/2021RG000769.
8. Sokolov S. V., Saltyakov E. A., Kormin A. N. Comprehensive geophysical studies of the state of the coal-bearing massif in the conditions of the Kuzbass. *Vestnik Kuzbass State Technical University.* 2017, no. 2, pp. 66–70. [In Russ].
9. Pisetskiy V. B., Robert Huang, Patrushev Yu. V., Zudilin A. E., Shnayder I. V., Shirobokov M. P. Results of tests of seismic systems for monitoring the stability of the rock mass in the construction of highways in China. *Mining Industry.* 2017, no. 2 (06), p. 108. [In Russ].
10. Romanov V. V., Malsky K. S., Poserenin A. I., Karinsky A. D. Estimation of rock mass strength and water content by geophysical methods. *Mining Journal.* 2018, no. 11, pp. 61–64. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.11.
11. Liu W., Liu Y., Li S. et al. A Review of Variational Mode Decomposition in Seismic Data Analysis. *Surv Geophys.* 2023, vol. 44, pp. 323–355. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09742-z>.
12. Razumov E. E., Prostov S. M. Basic principles of building a geomonitoring seismic system. *Mining Journal.* 2021, no. 1, pp. 8–12. [In Russ].
13. 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].
14. Astrakhantsev Yu. G., Bazhenova E. A., Beloglazova N. A., Vdovin A. G., Glukhikh I. I., Ivanchenko V. S., Khachai O. A. Comprehensive geophysical studies of rock massifs in

their natural occurrence. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018, 105 p. [In Russ].

15. Wang Z., Sun C. & Wu D. Near-surface Site Characterization Based on Joint Iterative Analysis of First-arrival and Surface-wave Data. *Surv Geophys.* 2023, no. 44, pp. 357–386. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09747-8>.

16. Wu B., Hu H. & Zhou H.W. Convolutional Neural Network-Assisted Least-Squares Migration. *Surv Geophys.* 2023, vol. 44(6), pp. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09777-w>.

17. Verdon J. P., Kendall J. M., Butcher A., Luckett R., Baptie B. J. Seismicity induced by longwall coal mining at the Thoresby Colliery, Nottinghamshire, UK. *Geophysical Journal International.* 2018, vol. 212, no. 2, pp. 942–954.

18. Kharisov T. F., Melnik V. V., Zamyatin A. L. Geophysical exploration studies in an underground mine. *Izvestiya Vuzov. Mining Journal.* 2020, no. 7, pp. 49–55. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-49-55.

19. Davydov V. A. Spectral analysis of microseismic sounding data. *Geophysics.* 2015, no. 1, pp. 72–77. [In Russ].

20. 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. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki.* 2021, no. 3, pp. 10–19. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Валиев Нияз Гадым оглы*¹ — докт. техн. наук, профессор, проректор, зав. кафедрой, e-mail: niyaz.valiev@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5556-2217;

*Шнайдер Иван Владимирович*¹ — аспирант, e-mail: ivan-shnajder@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9808-4219;

*Абдрахманов Марат Ильдусович*¹ — канд. техн. наук, доцент каф., e-mail: marat-ab@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0391-6204;

*Самсонов Владимир Иванович*¹ — старший преподаватель, ORCID: 0000-0001-8346-3606;

*Зудилин Александр Эдуардович*¹ — канд. геол.-минер. наук, доцент каф., ORCID: 0000-0002-6113-5043.

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

Для контактов: *Шнайдер И. В.*, e-mail: ivan-shnajder@yandex.ru, тел.: +79221066506

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Valiev N. G.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector, Head of Chair, e-mail: niyaz.valiev@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5556-2217;

*Shnaider I. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), e-mail: ivan-shnajder@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9808-4219;

*Abdrakhmanov M. I.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: marat-ab@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0391-6204;

*Samsonov V. I.*¹, Senior Lecturer, ORCID: 0000-0001-8346-3606;

*Zudilin A. E.*¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-6113-5043;

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia, 620144, Yekaterinburg, Kuybysheva St., 30.

Corresponding author: *Shnaider I. V.*, e-mail: ivan-shnajder@yandex.ru.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 04.10.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 04.10.2023; accepted for printing 10.12.2023.