

Спектральная характеристика микросейсмического излучения углепородных массивов Донбасса

©2025 А. А. Глухов[✉]

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Республиканский академический научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики,
геофизики и маркшейдерского дела» (РАНИМИ)
ул. Челюскинцев, 291, 283001, Донецк, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: в данной статье рассмотрен вопрос о характерных спектрах микросейсмического излучения, зарегистрированного в результате мониторинговых исследований в посёлке Объединённый (г. Макеевка, ДНР), расположенном над полем шахты «Калиновская-Восточная». Рассмотрены результаты анализа амплитудно-частотных характеристик микросейсмического излучения и выполнена оценка возможности их использования для прогноза строения верхней части геологического разреза.

Методика исследований: включала анализ спектральных характеристик микросейсмического излучения. Оценка распределения плотности пород по глубине выполнялась на основе предположения о связи амплитуды и частоты фундаментальной моды волны Рэлея с глубиной залегания породы и ее плотностью.

Результаты и их обсуждение: в результате исследований установлено, что распределения амплитуды микросейсмического излучения по глубине отличаются в зависимости от того, какие компоненты микросейсмического излучения и в какое время суток используются. Установлено, что спектральная характеристика микросейсмического излучения вблизи крупного надвига, сопровождаемого значительными зонами трещиноватости, существенно отличается от регистрируемой на ненарушенных участках. Сделано предположение, что зона надвига при ведении горных работ ввиду перераспределения напряжений становится областью активизации микросейсмических событий, связанных с образованием и ростом трещин. Получены спектральные отношения усреднённых ночных, а также дневных спектров за длительный период времени. Установлено отличие структуры спектральных отношений в зоне влияния надвига от структур спектральных отношений в зонах без тектонических нарушений.

Заключение: таким образом, результаты исследований показали, что в условиях застроенных территорий с высоким уровнем промышленности, подход, базирующийся на связи амплитуды и частоты фундаментальной моды волны Рэлея с глубиной залегания породы и ее плотностью требует методической доработки. Анализ спектральных характеристик микросейсмического излучения может быть использован для обнаружения областей трещиноватости породного массива, связанных с зонами влияния тектонических нарушений.

Ключевые слова: микросейсмическое излучение, микросейсмический мониторинг, метод сейсмического зондирования, зоны трещиноватости, программное обеспечение, спектральные характеристики, спектральные отношения



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Глухов Александр Александрович, e-mail: glukhov1964@yandex.ru

Источник финансирования: исследования выполнялись в ФГБНУ «РАНИМИ» в рамках государственного задания по теме FRSR-2023-0007

Для цитирования: Глухов А. А. Спектральная характеристика микросейсмического излучения угленосных массивов Донбасса // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2025. № 4. С. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/4/59-68>

Введение

Источники микросейсмического излучения могут быть как природные, так и техногенные. На территориях городских агломераций с высоким уровнем производства основным источником является деятельность человека. Работа оборудования, движение автотранспорта и другие причины искусственного характера вызывают, как правило, колебания в которых преобладают вертикальные смещения частиц пород в верхней части геологического разреза.

На основе анализа микросейсмического излучения базируется метод микросейсмического зондирования (ММЗ), примеры использования которого для прогноза строения толщи земных пород приведены в работах [1–4]. Обоснованы и найдены применение на практике подходы использования ММЗ для прогноза трещиноватых областей, которые могут быть коллекторами углеводородов [5–8]. Также метод находит применение для анализа приповерхностной части разреза [9–12] на малых глубинах. Целый ряд работ посвящен путям повышения точности ММЗ [13–15].

В 2020–2021 годах ФГБНУ «РАНИМИ» выполнял системные мониторинговые исследования микросейсмического излучения в посёлке «Объединённый» (г. Макеевка, ДНР), расположенном над полем шахты «Калиновская-Восточная», результаты которых описаны в ряде работ [8, 16–18]. Для анализа микросейсмического излучения использовалось специализированное программное обеспечение [19].

В данной статье рассмотрены результаты анализа амплитудно-частотных характеристик микросейсмического излучения и оценка возможности их использования для прогноза строения верхней части геологического разреза.

Алгоритмы анализа данных микросейсмических наблюдений

Мониторинговая система состояла из 4-х автономных станций, каждая из которых оснащена 3-компонентными велосиметрами HS-1 (Geospace Technologies, США) с частотным диапазоном от 2 до 500 Гц и цифровыми регистраторами «Ермак-5» с частотным диапазоном от 0.1 до 1000 Гц [20]. Для анализа амплитудно-частотного состава характеристик регистрируемых микросейсмических сигналов используются исходные трехкомпонентные сейсмозаписи длительностью один час.

Вычисление спектров выполняется как для исходных сейсмозаписей так и для отфильтрованных с использованием различных фильтров. Алгоритм

фильтрации стандартен и состоит из следующих последовательных этапов. На первом этапе выполняется вычисление функции фильтра F_n , $n=1..N$, представляющей собой массив той же длины N , что и спектр сейсмозаписей. Данная функция задается типом и параметром используемого фильтра. Затем применяется преобразование Фурье к исходной сейсмозаписи для получения спектра S_n . Получение преобразованного спектра выполняется путем перемножения элементов массивов F_n и S_n . Затем применяется обратное преобразование Фурье для получения отфильтрованной сейсмозаписи.

Кроме этого, предусмотрен расчет усредненных спектров горизонтальных и вертикальных компонент микросейсмического излучения в районе расположения каждого из сейсмоприемников для заданного диапазона времени, а также вычисление спектральных отношений. Спектральные отношения могут служить инструментом выделения и анализа колебаний различной природы. Если источник колебаний имеет глубинный характер, то можно считать, что в результате многократных трансформаций амплитуды вертикальной и горизонтальных компонент уравниваются, в то время как техногенные источники расположены на поверхности и генерируют колебания большей частью в вертикальной плоскости, что находит отражение в спектральных соотношениях.

При проведении исследований в местах расположения сейсмоприемников (СП) планировалось выполнять оценку распределения плотности пород по глубине на основе метода, изложенного в работах [1, 2, 6]. Основная идея заключается в том, что частота f фундаментальной моды волны Рэлея связана с глубиной h залегания породы соотношением:

$$h = 0.4 \times \frac{V_R(f)}{f} = 0.4 \times \lambda V_R(f), \quad (1)$$

где λ - длина волны, $V_R(f)$ - скорость ее распространения [6]. Вследствие закона сохранения энергии колебаний при распространении через области, характеризующиеся различными значениями плотности, спектральная амплитуда тем больше, чем меньше скорость распространения волны Рэлея [21].

Результаты исследований и их оценка

Рассмотрим для начала возможность оценки распределения плотности пород по глубине в условиях участка посёлка «Объединённый» на основе метода, изложенного в работах [1, 2, 6]. Построенные из предположения о связи амплитуды фундаментальной моды волн Рэлея на определенных частотах со скоростью распространения микросейсм согласно соотношению (1) разрезы приведены на рис. 1. При построении применялись спектры, полученные путем усреднения за 20 дней наблюдений. Для полноты рассмотрения при построении разрезов использованы спектры не только вертикальной, но и горизонтальной компоненты микросейсмического излучения.

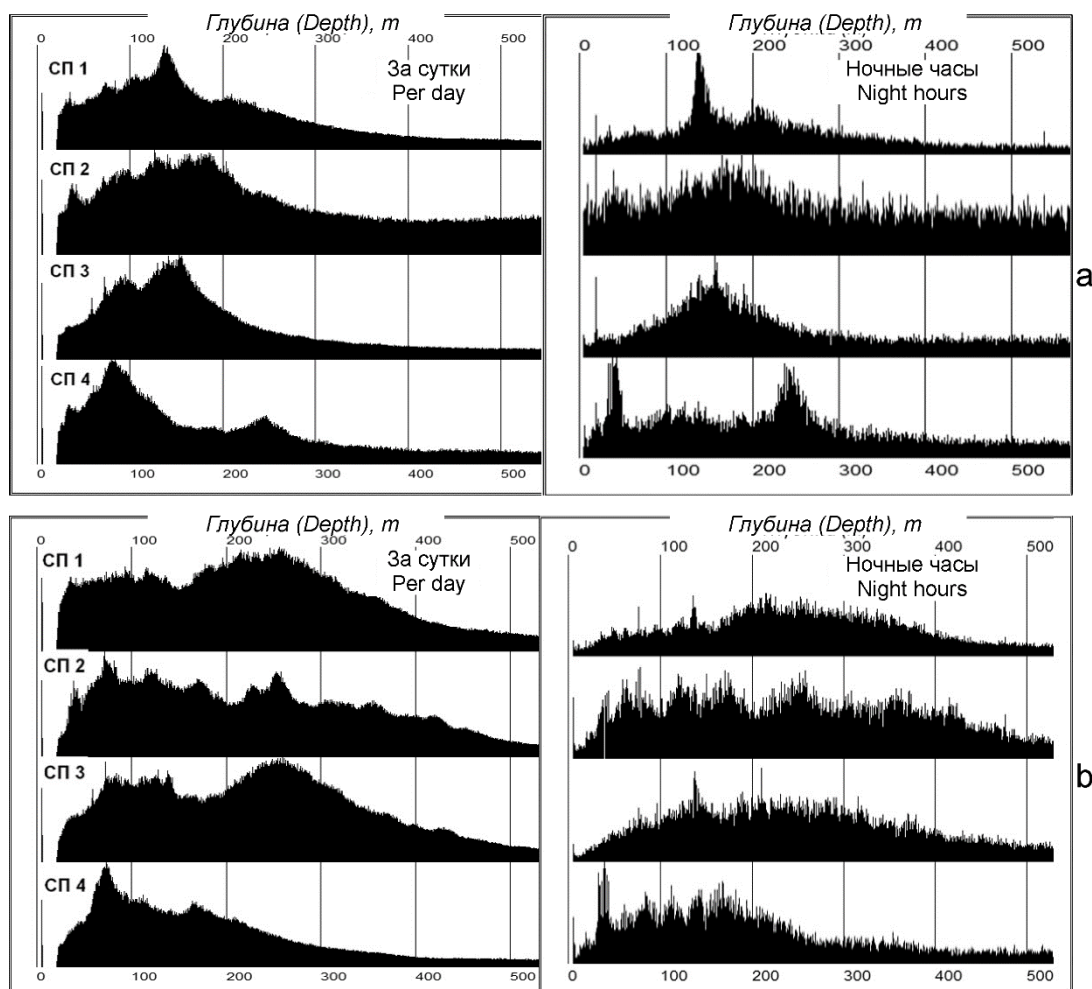


Рис. 1. Распределения амплитуды микросейсмических колебаний по глубине, рассчитанные на основе усредненных спектров *a)* вертикальной и *b)* горизонтальной компоненты микросейсмического излучения.

[Fig. 1. Distributions of the amplitude of microseismic vibrations by depth, calculated on the basis of averaged spectra of *(a)* vertical and *(b)* horizontal components of microseismic emission.]

Распределения амплитуды микросейсмического излучения по глубине отличаются в зависимости от того, какие компоненты и в какое время суток используются. Это говорит о том, что в данном случае алгоритм оценки распределения плотности пород по глубине не может быть применен в его классическом виде.

Во-первых, огромную роль в формировании спектра вносят шумы техногенного происхождения, во-вторых, формирующие итоговую волновую картину волны не обязательно имеют рэлеевский тип. Таким образом, в условиях застроенных территорий с высоким уровнем промышленности, рассматриваемый подход требует методической доработки.

Рассмотрим подробнее вопрос о характерных спектрах микросейсмического излучения, регистрируемых различными сейсмоприемниками в районе исследований. Используемая система обработки результатов наблюдений позволяет получать усредненные спектры для заданного количества дней наблюдений в заданном часовом диапазоне. На рис. 2 для примера приведены усредненные спектры, полученные за 20 дней наблюдений за полные сутки и в ночные часы (от 0 до 3 часов

утра) для вертикальной (Z) и горизонтальной (X) компоненты колебаний.

Рассчитанные усредненные спектры перед визуализацией нормированы каждый на свое максимальное значение. Следует отметить, что ненормированные амплитуды усредненных ночных спектров меньше, чем у спектров за полные сутки. Для иллюстрации на рис. 3 представлены графики изменения модуля средней амплитуды в течении суток в рабочей полосе частот (рис. 3а) и для диапазона частот до 2.0 Гц (рис. 3б) вертикальной компоненты микросейсмического излучения в районе расположения СП № 4.

При этом следует отметить, что средняя амплитуда спектра вертикальной компоненты микросейсмического излучения для полного диапазона частот на два порядка больше спектральной амплитуды низкочастотной составляющей. По этой причине потребовалось для наглядности представить два соответствующих графика. Анализ графиков показывает, что в рабочей полосе частот разница модуля средних амплитуд между дневными и ночными значениями составляет 15–20 %, а для диапазона частот до

2.0 Гц эта разница может достигать 30 %. Графики изменения средней спектральной амплитуды микросейсмического излучения в течение суток для рай-

онов размещения других сейсмоприемников подобны и не несут новой информации, поэтому в данной статье не приводятся.

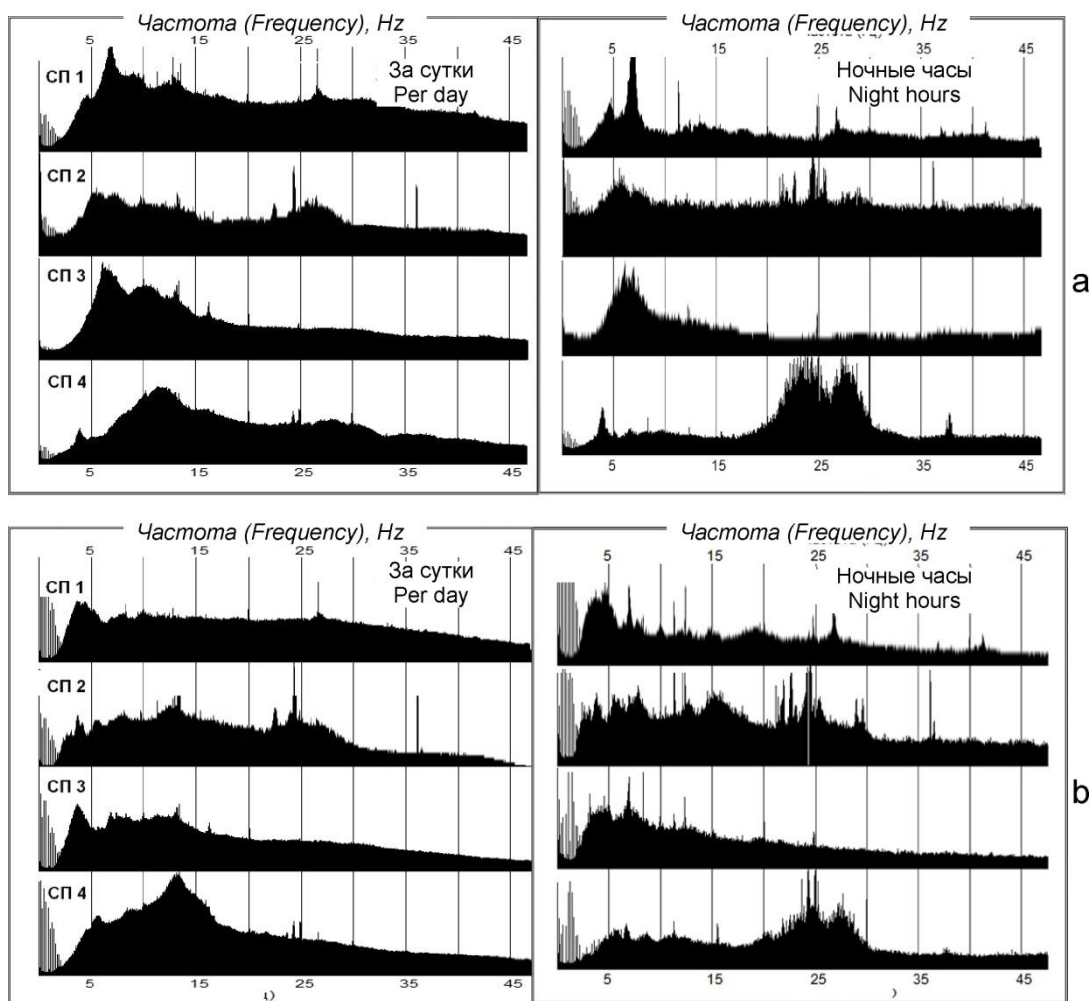


Рис. 2. Усредненные нормированные спектры микросейсмического излучения *a)* вертикальной (Z) и *b)* горизонтальной (X) компонент поля колебаний.

[Fig. 2. Averaged normalized spectra of microseismic radiation of *(a)* vertical (Z) and *(b)* horizontal (X) components of the oscillation field.]

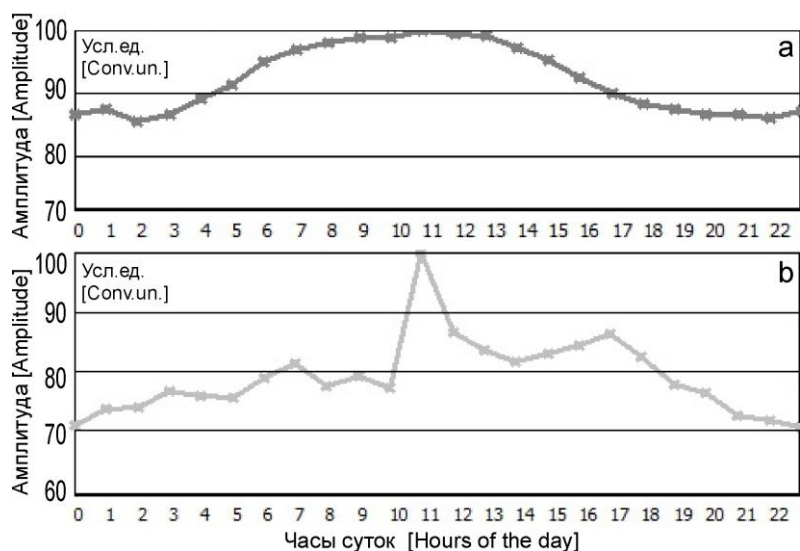


Рис. 3. Графики изменения модуля средней амплитуды в течение суток для полного диапазона частот (*a)* и для диапазона частот до 2.0 Гц (*b)*).

[Fig. 3. Graphs of the change in the average amplitude module during the day for the full frequency range (*a)* and for the frequency range up to 2.0 Hz (*b*).]

Вернемся к рассмотрению усредненных спектров. Поскольку усреднение выполняется за длительный период времени (в приведенном случае по 480 спектрам), результаты воздействия случайных факторов можно считать нивелированными. В амплитудно-частотном спектре как вертикальной, так и горизонтальной составляющих микросейсмического излучения в районах размещения сейсмоприемников № 1, № 2 и № 3 отмечаются максимумы на частотах от 3 до 7 Гц. Они проявляются как в суточных, так и в ночных спектрах. Для района размещения СП №4 максимум усредненного суточного спектра микросейсмического излучения отмечается на частотах 12–14 Гц, тогда как для усредненных «ночных» спектров на частотах от 20 до 30 Гц. Для района размещения СП № 2 также характерен локальный максимум в суточном спектре микросейсмического излучения на частотах от 20 до 30 Гц, хотя он имеет гораздо меньшую амплитуду. В районах размещения всех сейсмоприемников на частотах более 20 Гц в суточных спектрах микросейсмического излучения наблюдается общая тенденция понижения амплитуды с повышением частоты.

Горные работы порождают сейсмические события, вызванные целым рядом причин. Среди основных следует выделить образование трещин в горных породах при перераспределении напряжений в результате выработки, обрушение пород кровли, сотрясение от падения обломков пород [22]. Кроме этого, следует принимать во внимание шум работы добычного комбайна и иного оборудования. Все перечисленные события генерируют объемные волны. Причем смещение частиц среды у некоторых событий генерируется в вертикальной плоскости. Например, при отрыве откалывающихся от кровли блоков породы возникает упругая отдача пород, вектор которой направлен вверх [23, 24]. При падении блоков на почву выработки также возникает импульс направленный вертикально. Такие события могут иметь низкочастотный характер (0.5–2.0 Гц), в то время как образование трещин и разрушение пород – высокочастотный (8–30 Гц) [23, 24].

Массив горных пород на участке наблюдений представляет собой набор пластов плотных и трещиноватых песчаников, скорости распространения сейсмических волн в которых характеризуются высокими и пониженными значениями, соответственно. СП № 4 расположен в непосредственной близости от крупного надвига. По данным бурения на глубинах от 254 м, до 380 м и на более глубоких участках расположен трещиноватый песчаник с многочисленными зеркалами скольжения.

Оценка положения сейсмоприемников относительно зоны горных работ дает следующие результаты. СП № 4 находится в непосредственной близости от отработываемого участка 5-й восточной лавы шахты «Калиновская-Восточная». Характерный локальный максимум в спектре микросейсмического излучения на частотах от 20 до 30 Гц может быть обусловлен горными работами, которые ведутся в круглосуточном режиме. Это подтверждается тем, что в ночное время, когда

интенсивные источники колебаний на поверхности замолкают, данное излучение доминирует. В то же время и сейсмоприемник № 1 тоже расположен над зоной горных работ, но спектры микросейсмического излучения и спектральные отношения в районах расположения для СП № 1 и СП № 4 существенно различаются. В ночном спектре микросейсмического излучения в районе расположения СП № 1 не проявляется пик спектральных амплитуд на частотах 20–30 Гц, что необъяснимо, если считать, что он вызван только шумом горных работ. Возможно, как вариант, зона надвига в непосредственной близости от СП № 4 при ведении горных работ ввиду перераспределения напряжений становится областью активизации микросейсмических событий, связанных с образованием и ростом трещин. Такие события, как отмечалось выше, порождают объемные волны именно в этом частотном диапазоне.

Отдельный вопрос состоит в анализе отношений спектральных характеристик. Ранее было обосновано предположение о том, что для колебаний, вызванных глубинными источниками естественной природы соотношение спектров вертикальных и горизонтальных компонент близко к 1.0 [25]. Это объясняется многократными взаимными трансформациями колебаний на многочисленных разделах сред на пути от источника к месту регистрации. Источники искусственного происхождения, как правило, генерируют колебания в вертикальной плоскости. На рис. 4 представлены спектральные отношения исходной часовой сейсмозаписи микросейсмического излучения в районе размещения СП № 1 (фрагмент экранной копии модуля обработки микросейсмической информации). Значение спектральных отношений повышается с ростом частоты. Колебания близких по частоте значений амплитуды имеют хаотичный характер вызванный, очевидно, случайными причинами. На низких частотах величины отношений сравнительно малы, тогда как на частотах более 5 Гц достигают нескольких десятков единиц. Это вызвано случайными факторами искусственного происхождения, генерирующими преимущественно колебания в вертикальном направлении.

На рис. 5 представлены спектральные отношения, полученные с использованием усредненных ночных (от 0 до 3 часов ночи), а также дневных (от полудня до 15 часов) спектров микросейсмического излучения за период 20 дней (с 1 по 20 мая 2021 г) в районах расположения СП № 1, СП № 3 и СП № 4. Используются логарифмические шкалы как по частоте, так и по амплитуде. В отличие от изображенных на рис. 4, на усредненных спектральных отношениях существенно уменьшено влияние случайных факторов. В частности, это проявилось в том, что даже на высоких частотах для всех сейсмоприемников значения спектральных отношений не превышает 10. В низкочастотном диапазоне (до 2 Гц) значения спектральных отношений близки к 1.0. Для районов размещения СП № 1 и СП № 3 спектральные отношения микросейсмического излучения подобны. На частотах от 2 до 5 Гц наблюдается характерный максимум, а на частотах от 5 до 10 Гц

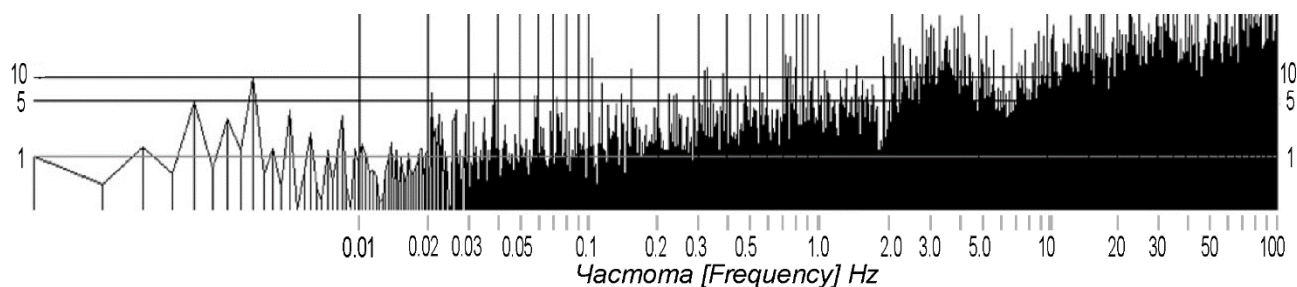


Рис. 4. Спектральные отношения для исходной не нормированной сейсмозаписи длительностью один час.

[Fig. 4. Spectral ratios for the original non-normalized seismic recording with a duration of one hour.]

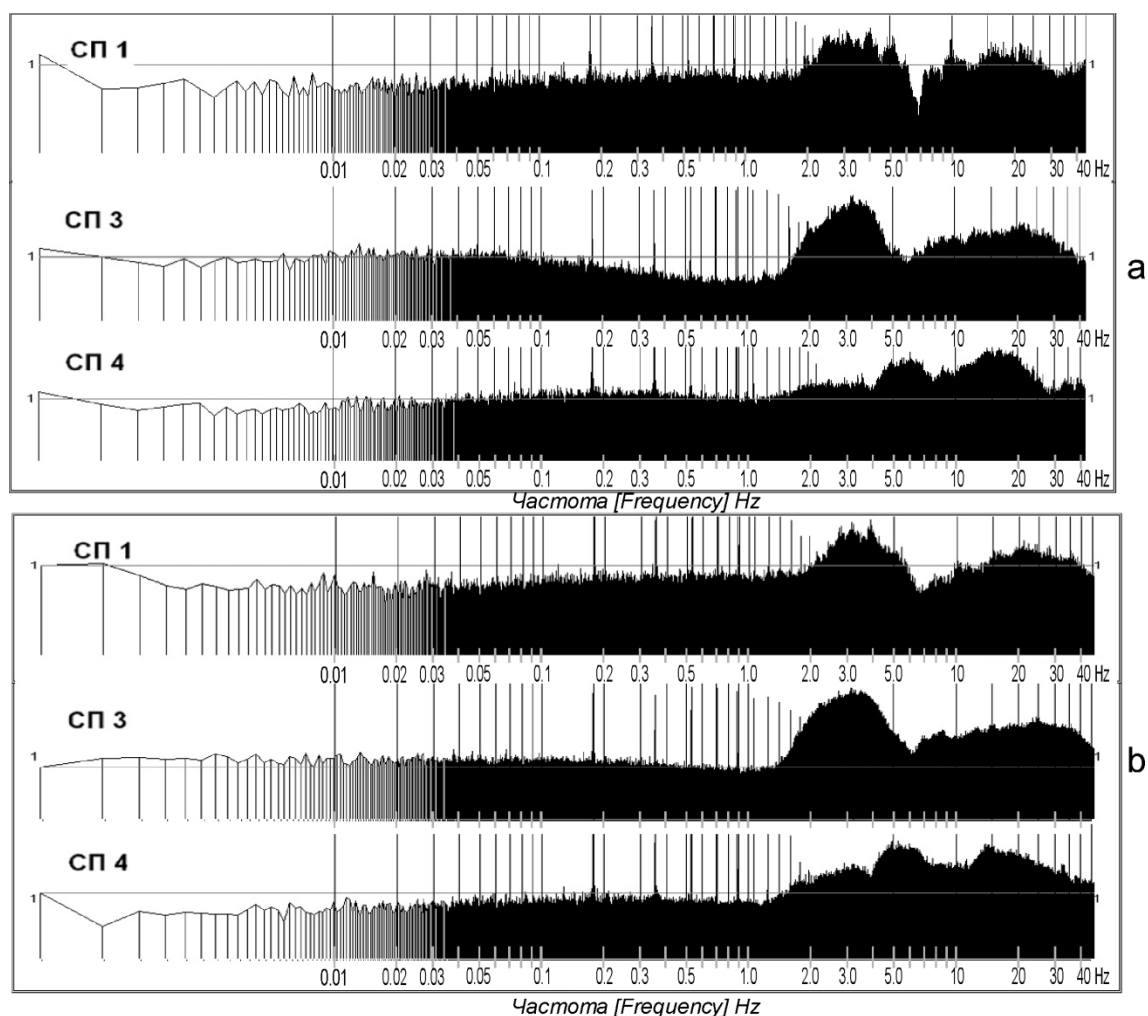


Рис. 5. Спектральные отношения, полученные с использованием усредненных ночных (a) и дневных (b) спектров за период 20 дней.

[Fig. 5. Spectral ratios obtained using averaged nighttime (a) and daytime (b) spectra over a period of 20 days.]

наблюдается «провал». На более высоких частотах значения спектральных отношений снова растут. В спектре микросейсмического излучения в районе размещения СП № 4 первый максимум размещается на частотах от 4 до 7 Гц, второй располагается на частотах от 10 до 25 Гц. Характерно отличие структуры спектральных отношений для района размещения СП № 4 от структуры для районов размещения остальных сейсмоприемников, что следовало ожидать ввиду

различия в структурах спектров.

Выводы

Таким образом, в данной статье рассмотрен вопрос о характерных спектрах микросейсмического излучения, зарегистрированного в результате мониторинговых исследований в посёлке Объединённый (г. Макеевка, ДНР), расположенном над полем шахты «Калиновская-Восточная».

Рассмотрена возможность оценки распределения плотности пород по глубине на основе предположения о связи амплитуды и частоты фундаментальной моды волны Рэлея с глубиной залегания породы и ее плотностью. Показано, что в условиях застроенных территорий с высоким уровнем промышленности, рассматриваемый подход требует методической доработки.

Дан анализ зависимости спектральных характеристик от времени суток, рассмотрена природа регистрируемого излучения в различных частотных диапазонах. Показано, что структура спектральной характеристики микросейсмического излучения вблизи крупного надвига, сопровождаемого значительными зонами трещиноватости, существенно отличается от того, которое регистрируется на ненарушенных участках. Сделано предположение, что зона надвига при ведении горных работ ввиду перераспределения напряжений становится областью активизации микросейсмических событий, связанных с образованием и ростом трещин.

Рассмотрены спектральные отношения, полученные с использованием усредненных ночных, а также дневных спектров за длительный период времени. Установлено отличие структуры спектральных отношений в зоне влияния надвига от структур спектральных отношений в зонах без тектонических нарушений.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбатилов А. В. Возможность оценки параметров геологических объектов на основе использования фонового микросейсмического поля. Результаты экспериментальных исследований и моделирование // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*. 2006. С. 66–71
2. Горбатилов А. В., Степанова М. Ю., Кораблев Г. Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование с помощью микросейсм // *Физика Земли*. 2008. № 7. С. 66–84
3. Пупатенко В. В., Рябинкин К. С. Строение разломных зон юго-западной части Среднеамурского осадочного бассейна (Приамурье) по данным микросейсмических зондирований // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2022. № 4. С. 3–9
4. Орлов В. А. Опыт использования микросейсмического шума для решения геологических задач в условиях платформы на примере воронежского кристаллического массива / *Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология*. 2011. № 1. С. 183–192
5. 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.
6. Горбатилов А. В. Примеры практического опробования метода микросейсмического зондирования в интересах изучения, разведки и разработки месторождений углеводородов. *Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век: материалы конференции*. Новосибирск, 2021. С. 240–243. DOI 10.25205/978-5-4437-1248-2-240-243
7. Lin Tian, Yunxing Cao, Shimin Liu, Bin Shi, Jianzhong Liu, Derek Elsworth Coalbed methane reservoir fracture evaluation through the novel passive microseismic survey and its implications on permeable and gas production // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 76. P. 1–10
8. Анциферов А. В., Туманов В. В., Новгородцева Л. А., Анциферов В. А., Бородин Д. С. Возможности обнаружения трещиноватых газонасыщенных зон на шахтных полях с использованием микросейсм. Труды РАНИМИ. 2023. № 20–21 (35–36). С. 101–111. DOI: 10.24412/1996-885X-2023-20-2135-36-101-111
9. Горбатилов А. В., Рогожин Е. А., Степанова М. Ю., Зиновьев И. А., Турчков А. М., Бабаян А. Д., Андреева Н. В. Опыт применения метода микросейсмического зондирования в инженерно-геологических изысканиях на территории новомосковского административного округа г. Москвы. *Сейсмические технологии – 2017: материалы конференции*. МГУ, 2017. С. 227–230
10. Abudeif A. M., Fat-Helbary R. E., Mohammed M. A., El-Khashab H. M., Masoud M. M. Estimation of the Sute Effect Using Microtremor Technique at New Akhmim City, Akhmim, Sohag, Egipt // *Russian Geology and Geophysics*. 2019. Vol. 60. P. 231–239. DOI:10.15372/RGG2019036
11. Sung-Woo Moon, Palanidoss Subramaniam, Yunhuo Zhang, Ganapathiraman Vinoth, Taeseo Ku. Bedrock depth evaluation using microtremor measurement: empirical guidelines at weathered granite formation in Singapore // *Journal of Applied Geophysics*. 2019. Vol. 171. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103866
12. Hung Nguyen-Tien, Phuong Nguyen-Hong, Minh Nguyen-Le, Lin Che-Min, Nguyen Tran-Auyen Pham-The, Duong Nguyen-Van. Establishment of the correlation between the near-surface sedimentary thickness and the microtremor dominant frequency in the Hanoi area // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. 2022. Vol. 45(1). P. 49–66. DOI: 10.15625/2615-9783/17569
13. Пупатенко В. В. Об оценках точности метода микросейсмического зондирования // *Региональные проблемы*. 2022. Т. 25. № 3. С. 91–93. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-91-93
14. Давыдов В. А. Малоглубинное сейсмическое зондирование на основе изучения эллиптичности микросейсм // *Георесурсы*. 2019. Т. 21. № 1. С. 78–85. DOI: 10.18599/grs.2019.1.78-85
15. Zhang, Y., Liu, X.Q., Song, L.W. and Dong, H.L. Microseismic event detection based on multiscale detection convolutional neural network // *Journal of Seismic Exploration*. 2023. Vol. 32. PP. 455–477. DOI:10.1016/j.jappgeo.2021.104380
16. Волкова Т. П., Репина К. В., Петрова А. А. Оценка геодинамической активности разломов поля шахты «Калиновская-Восточная». Труды РАНИМИ: Донецк,

2024. № 1 (39). С. 78–93

17. Мартынов Г. П., Туманов В. В., Грицаенко А. Ю., Бородин Д. С. Анализ пассивных и активных сейсмических наблюдений на поле шахты «Калиновская-Восточная». Труды РАНМИ: Донецк, 2024. № 3 (41), С. 232–245

18. Анциферов А. В., Глухов А. А., Камбурова Л. А. О результатах анализа данных микросейсмического мониторинга углепородного массива // *Горный журнал*. 2025. № 3. С. 35–40. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.05

19. Анциферов А. В., Глухов А. А., Туманов В. В., Новгородцева Л. А. О программном комплексе обработки результатов микросейсмического мониторинга углепородных массивов // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2023. Т. 10. № 1. С. 15–22. DOI: 10.15372/FPVGN.2023.100103

20. Бутырин П. Г. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Пять лет развития // *Российский сейсмологический журнал*. 2021. Т. 3. № 3. С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.06>

21. Яновская Т. Б. К теории метода микросейсмического зондирования // *Физика Земли*. 2017. № 6. С. 18–23

22. Долгов П. В., Полянина Г. Д., Земсков А. Н. Методы прогноза и предотвращения газодинамических явлений в калийных рудниках. Алма-Ата: Наука, 1987. 176 с.

23. Маловичко А. А., Маловичко Д. А. Изучение характеристик низкочастотных волн при сейсмическом мониторинге в нарушенном соляном массиве. *Горная геофизика: материалы конференции*. СПб.: ВНИМИ, 1998. С. 152–151

24. Маловичко А. А., Дягилев Р. А., Шулаков Д. Ю., Кустов А. К. Мониторинг техногенной сейсмичности на рудниках и шахтах Западного Урала. *Горная геофизика: материалы конференции*. СПб.: ВНИМИ, 1998. С. 147–151

25. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Quarterly Report of Railway Technical Institute*. 1989. Vol. 30. No. 1. P. 25–33

GEOPHYSICS

UDC: 539.421

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/4/59–68>

Received: 17.10.2025

Accepted: 27.11.2025

Published online: 31.12.2025

Spectral characteristics of microseismic emission of coal rock masses of Donbass

©2025 A. A. Glukhov✉

Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Chelyuskintsev str., 291, 283001, Donetsk, Russian Federation

Abstract

Introduction: the matter of characteristic spectra of the microseismic emission recorded in the result of monitoring studies in the settlement of Obiedinenny (city of Makeyevka, Donetsk People's Republic), which is located above the Kalinovskaya-Vostochnaya mine, is examined in this article. The results of the analysis of microseismic emission amplitude-frequency characteristics are considered and an assessment of their potential use for predicting the structure of the upper partition of geologic cross-section is made.

The research methodology included: the analysis of microseismic emission amplitude-frequency characteristics. The assessment of rock density distribution by depth was made based on the assumption that the fundamental Rayleigh wave mode amplitude and frequency depend on the rock stratification depth and its density.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Alexandr A. Glukhov, e-mail: glukhov1964@yandex.ru

Results and discussion: in the result of the research, it has been established that microseismic emission amplitude distribution by depth differs depending on the microseismic emission components used and on the time of day. It has been established that the spectral characteristics of microseismic emission near a large upthrust associated with significant rock-fracture zones differ markedly from those recorded at undisturbed areas. An assumption has been made that due to stress redistribution in the course of mining operations, an upthrust zone turns into an area of microseismic events reinvigoration related to cracks formation and propagation. Spectral ratios of averaged nighttime and daytime spectra over a long period of time have been obtained. A difference between the spectral ratio structure in the upthrust influence zone and the spectral ratio structures in tectonic no-disturbance zones has been established.

Conclusion: therefore, the research results demonstrated that under the conditions of heavily industrialized built-up areas, the approach basing on the fundamental Rayleigh wave mode amplitude and frequency dependence on the rock stratification depth and density requires being subjected to methodological revision. Analysis of microseismic emission spectral characteristics can be used for detecting rock mass fracture areas associated with tectonic disturbance influence zones.

Keywords: microseismic radiation, microseismic monitoring, seismic sounding method, fracture zones, software, spectral characteristics, spectral relations

Funding: studies were carried out at the Federal State Budgetary Scientific Institution "RANIMI" as part of the state assignment on the topic FRSR-2023-0007.

For citation: Glukhov A. A. Spectral characteristics of microseismic emission of coal rock masses of Donbass // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 4, pp. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/4/59-68>

Conflict of interests: The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

- Gorbatikov A. V. Vozmozhnost' ocenki parametrov geologicheskikh ob"ektov na osnove ispol'zovaniya fonovogo mikrosejsmicheskogo polya. Rezul'taty ehksperimental'nykh issledovaniy i modelirovaniye [The possibility of estimating the parameters of geological objects based on the use of a background microseismic field. Results of experimental studies and modeling]. *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh – Modern methods of processing and interpretation of seismological data*, 2006, pp. 66–71 (In Russ)
- Gorbatikov A. V., Stepanova M. Yu., Korablev G. E. Zakonomernosti formirovaniya mikrosejsmicheskogo polya pod vliyaniem lokal'nykh geologicheskikh neodnorodnostey i zondirovaniye s pomoshch'yu mikrosejsm [Regularities of the formation of a microseismic field under the influence of local geological inhomogeneities and sounding using microseisms]. *Fizika Zemli – Physics of the Earth*, 2008, no. 7, pp. 66–84 (In Russ.)
- Pupatenco V. V., Ryabinkin K. S. Stroenie razlomnykh zon yugo-zapadnoj chasti Sredneamurskogo osadochnogo bassejna (Priamur'e) po dannym mikrosejsmicheskikh zondirovaniy [The structure of fault zones in the southwestern part of the Middle Amur sedimentary basin (Amur region) according to microseismic sounding data]. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo centra DVO RAN – Proceedings of Northeastern Scientific Center FEB RAS*, 2022, no. 4, pp. 3–9 (In Russ)
- Orlov V. A. Opyt ispol'zovaniya mikrosejsmicheskogo shuma dlya resheniya geologicheskikh zadach v usloviyakh platformy na primere voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Experience of using microseismic noise to solve geological problems in the conditions of the platform on the example of the Voronezh crystal massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2011, no. 1, pp. 183–192 (In Russ)
- Sharapov I. R., Feofilov S. A. Nazemnye passivnye mikrosejsmicheskie monitoringi pri izuchenii, razrabotke i ehkspluatatsii nedr v neftegazovoj i gornodobyvayushchej otraslyakh [Terrestrial passive microseismic monitoring and in the study, development and exploitation of subsurface resources in the oil and gas and mining industries]. *Pribory i sistemy razvedochnoj geofiziki – Instruments and systems of exploration geophysics*, 2021, no. 3, pp. 10–19 (In Russ)
- Gorbatikov A. V. Primery prakticheskogo oprobovaniya metoda mikrosejsmicheskogo zondirovaniya v interesakh izucheniya, razvedki i razrabotki mestorozhdenij uglevodorodov [Examples of practical testing of the microseismic sounding method in the interests of studying, exploration and development of hydrocarbon deposits]. *Novye vyzovy fundamental'noj i prikladnoj geologii nefti i gaza – XXI vek: materialy konferencii* [New challenges of fundamental and applied geology of oil and gas – XXI century: coll. art. conference], Novosibirsk publ., 2021, pp. 240–243 (In Russ)
- Lin Tian, Yunxing Cao, Shimin Liu, Bin Shi, Jianzhong Liu, Derek Elsworth Coalbed methane reservoir fracture evaluation through the novel passive microseismic survey and its implications on permeable and gas production. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, vol. 76, pp. 1–10
- Antsiferov A. V., Tumanov V. V., Novgorodtseva L. A., Antsiferov V. A., Borodin D. S. Vozmozhnosti obnaruzheniya treshchinovatykh gazonasyshchenykh zon na shakhtnykh polyakh s ispol'zovaniem mikrosejsm [Possibilities of detecting fractured gas-saturated zones in mine fields using microseisms]. *Trudy RANIMI* [The work of the Transactions of RANIMI], Donetsk: RANIMI publ., 2023, no. 20–21 (35–36), pp. 101–111 (In Russ)
- Gorbatikov A. V., Rogozhin E. A., Stepanova M. Yu., Zinoviev I. A., Turchkov A. M., Babayan A. D., Andreeva N. V. Opyt primeneniya metoda mikrosejsmicheskogo zondirovaniya v inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh na territorii novomoskovskogo administrativnogo okruga g. Moskvy [Experience of using the microseismic sounding method in engineering and geological surveys on the territory of the Novomoskovsky administrative district of Moscow]. *Sejsmicheskie tekhnologii–2017* [Seismic technologies – 2017: coll. art. conference], Moscow:

MSU publ., 2017, pp. 227–230 (In Russ)

10. Abudeif A. M., Fat-Helbary R. E., Mohammed M. A., El-Khashab H. M., Masoud M. M. Estimation of the Sute Effect Using Microtremor Technique at New Akhmim City, Akhmim, Sohag, Egypt. *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, pp. 231–239

11. Sung-Woo Moon Palanidoss Subramaniam, Yunhuo Zhang, Ganapathiraman Vinoth, Taeseo Ku. Bedrock depth evaluation using microtremor measurement: empirical guidelines at weathered granite formation in Singapore. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, vol. 171, pp. 1–9

12. Hung Nguyen-Tien Phuong Nguyen-Hong, Minh Nguyen-Le, Lin Che-Min, Nguyen Tran-Auyen Pham-The, Duong Nguyen-Van. Establishment of the correlation between the near-surface sedimentary thickness and the microtremor dominant frequency in the Hanoi area. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2022, vol. 45(1), pp. 49–66

13. Pupatenko V. V. Ob ocenakh tochnosti metoda mikrosejsmicheskogo zondirovaniya [On estimates of the accuracy of the microseismic sensing method]. *Regional'nye problem – Regional problems*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 91–93 (In Russ)

14. Davydov V. A. Maloglubinnoe sejsmicheskoe zondirovanie na osnove izucheniya ehlliptichnosti mikrosejsm [Shallow seismic sounding based on the study of ellipticity of microseisms]. *Georesursy – Georesources*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 78–85 (In Russ)

15. Zhang, Y., Liu, X. Q., Song, L. W., Dong, H. L. Microseismic event detection based on multiscale detection convolutional neural network. *Journal of Seismic Exploration*, 2023, vol. 32, pp. 455–477

16. Volkova T. P., Repina K. V., Petrova A. A. Ocenka geodinamicheskoy aktivnosti razlomov polya shakhty «Kalinovskaya-Vostochnaya» [Assessment of geodynamic activity of faults in the Kalinovskaya-Vostochnaya mine field]. *Trudy RANIMI* [The work of the Transactions of RANIMI], Donetsk: RANIMI publ., 2024, vol. 1(39), pp. 78–93 (In Russ)

17. Martynov G. P., Tumanov V. V., Gritsaenko A. Yu., Borodin D. S. Analiz passivnykh i aktivnykh sejsmicheskikh nablyudenij na pole shakhty «Kalinovskaya-Vostochnaya» [Analysis of passive and active seismic observations in the field of the Kalinovskaya-Vostochnaya mine]. *Trudy RANIMI* [The work of the Transactions of RANIMI], Donetsk: RANIMI publ., 2024, no. 3(41), pp. 232–245 (In Russ)

18. Antsiferov A. V., Glukhov A. A., Kamburova L. A. O rezul'tatakh analiza dannykh mikrosejsmicheskogo monitoringa ugleporodnogo massiva [On the results of data analysis of microseismic monitoring of the carboniferous massif]. *Gornyy zhurnal – Mining Journal*, 2025, no. 3, pp. 35–40 (In Russ)

19. Antsiferov A. V., Glukhov A. A., Tumanov V. V., Novgorodtseva L. A. O programmnom komplekse obrabotki rezul'tatov mikrosejsmicheskogo monitoringa ugleporodnykh massivov [On the software package for processing the results of microseismic monitoring of carboniferous massifs]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk – Fundamental and applied issues of mining Sciences*, 2023, vol. 10, no. 1, pp. 15–22 (In Russ)

20. Butyrin P. G. Cifrovoy sejsmicheskij registrator «Ermak-5». Pyat' let razvitiya [Digital seismic recorder Ermak-5. Five years of development]. *Rossiyskij sejsmologicheskij zhurnal – Russian Seismological Journal*, 2021, vol. 3, no. 3, pp. 84–94 (In Russ)

21. Yanovskaya T. B. K teorii metoda mikrosejsmicheskogo zondirovaniya [On the theory of the microseismic sounding method]. *Fizika Zemli – Physics of the Earth*, 2017, no. 6, pp. 18–23 (In Russ)

22. Dolgov P. V., Polyanina G. D., Zemskov A. N. *Metody prognoza i predotvrashcheniya gazodinamicheskikh yavlenij v kalinykh rudnikakh* [Methods of forecasting and prevention of gas dynamic phenomena in potash mines]. Alma-Ata: Nauka publ., 1987, 176 p. (In Russ)

23. Malovichko A. A., Malovichko D. A. Izuchenie kharakteristik nizkochastotnykh voln pri sejsmicheskoy monitoringe v narushennom solyanom massive [Studying the characteristics of low-frequency waves during seismic monitoring in a disturbed salt massif]. *Gornaya geofizika* [Mining Geophysics; coll. art. conference], Saint Petersburg; VNIMI publ., 1988, pp. 152–151 (In Russ)

24. Malovichko A. A., Diaghilev R. A., Shulakov D. Yu., Kustov A. K. Monitoring tekhnogennoj sejsmichnosti na rudnikakh i shakhtakh Zapadnogo Urala [Monitoring of technogenic seismicity in mines and mines of the Western Urals]. *Gornaya geofizika* [Mining Geophysics; coll. art. conference], Saint Petersburg; VNIMI publ., 1988, pp. 147–151 (In Russ)

25. Nakamura Y. A Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Institute*, 1989, vol. 30, no. 1, pp. 25–33

Глухов Александр Александрович, д.тех.н., ст.н.с., зам. директора по научной работе Республиканского академического научно-исследовательского и проектно-конструкторского института горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), Донецк, Российская Федерация; e-mail: glukhov1964@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9816-5628>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Aleksandr A. Glukhov, Dr. habil. in Techn., Senior Researcher, Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Deputy Director for Science, Donetsk, Russian Federation; e-mail: glukhov1964@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9816-5628>

Author have read and approved the final manuscript.