

УДК 550.8.08:550.34.016

Грицаенко Антон Юрьевич

научный сотрудник,
отдел эколого-геофизических исследований,
Республиканский академический
научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт горной
геологии, геомеханики, геофизики
и маркшейдерского дела (ФГБНУ «РАНИМИ»)
283004, ДНР, г. Донецк, ул. Челюскинцев, 291
e-mail: anthony.yuriev.ya.ru

Мартынов Геннадий Павлович

старший научный сотрудник,
отдел эколого-геофизических исследований,
Республиканский академический
научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт горной
геологии, геомеханики, геофизики
и маркшейдерского дела
e-mail: oemi@list.ru

Твердохлеб Владислав Павлович

инженер,
отдел эколого-геофизических исследований,
Республиканский академический
научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт горной
геологии, геомеханики, геофизики
и маркшейдерского дела
e-mail: vladislavtverdohleb@gmail.com

**МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ
АКТИВНОСТИ РАЗЛОМОВ
НА ШАХТНЫХ ПОЛЯХ ДОНБАССА***Аннотация:*

Изучение геодинамики и прогнозирование опасных геологических процессов в тектонических разломах позволяют определять положение коллекторов метана на шахтных полях. Так, изучение систем разломов в Донбассе позволяет прогнозировать газодинамические явления в горных выработках, так как случайное вскрытие аномального скопления метана при проведении горных работ создает аварийную ситуацию на шахте. Поэтому выявление тектонических нарушений до начала ведения добычи угля является актуальной задачей.

К современным способам решения данной задачи относятся методы активной и пассивной сейсморазведки. Активная сейсморазведка способна выделять геологические нарушения и скопления метана, отличающиеся от вмещающих пород динамическими и кинематическими характеристиками упругих волн. Пассивная сейсморазведка базируется на другой физической основе. В этом случае тектонические нарушения и вмещающие коллекторы метана выявляются не по их физическим свойствам, а по микросейсмическому излучению, обусловленному трещинообразованием в приразломных зонах.

DOI: 10.25635/2313-1586.2026.01.086

Gritsaenko Anton Y.

Researcher,
Environmental and Geophysical
Research Department,
Republican Academic Scientific,
Research and Design Institute for Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying
(RANIMI),
283004 Donetsk, DPR, 291 Chelyuskintsev Str.
e-mail: anthony.yuriev@ya.ru

Martynov Gennadiy P.

Senior Researcher,
Environmental and Geophysical
Research Department,
Republican Academic Scientific,
Research and Design Institute for Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics
and Mine Surveying
e-mail: oemi@list.ru

Tverdokhle Vladislav P.

Engineer,
Environmental and Geophysical
Research Department,
Republican Academic Scientific,
Research and Design Institute for Mining Geology,
Geomechanics, Geophysics
and Mine Surveying
e-mail: vladislavtverdohleb@gmail.com

**MICROSEISMIC STUDIES INTO
THE GEODYNAMIC ACTIVITY
OF TECTONIC FAULTS
AT DONBASS MINE FIELDS***Abstract:*

The study of geodynamics and prediction of dangerous geological processes in tectonic faults make it possible to determine the position of methane reservoirs in mine fields. Thus, the study of tectonic fault systems in the Donbas makes it possible to predict gas-dynamic phenomena in mining operations, because the accidental encountering an abnormal accumulation of methane during mining creates an emergency situation at the mine. Therefore, the identification of tectonic dislocations before the start of coal mining is a topical task.

Modern methods of solving this problem include methods of active and passive seismic exploration. Active seismic exploration is able to identify geological disturbances and methane accumulations that differ from the host rocks in their dynamic and kinematic characteristics of elastic waves. Passive seismic exploration is based on a different physical basis. In this case, tectonic dislocations and host methane reservoirs are detected not by their physical properties, but by microseismic events caused by fracturing in fractured zones.

Thus, the mechanism of seismic events formation is determined by the methods of seismology and microseismics. This makes it possible to identify sections

Методами сейсмологии и микросейсмики определяется механизм образования сейсмических событий. Это позволяет по микросейсмическому излучению в зоне динамического влияния разломов выделить участки горного массива, находящиеся в состоянии горизонтального сжатия или растяжения.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по разработке аппаратуры и обработке данных микросейсмического зондирования при проведении опытных работ по оценке геодинамической активности, газозносности и изменения во времени геофизических полей разломов на шахтах Донбасса для эффективной и безопасной добычи угля в рамках выполнения государственного задания по теме № FRSR-2026-0006. Особое внимание уделено разработке специальных методов анализа спектров микросейсмических колебаний, записанных различными модификациями сейсмических датчиков SM-3KV.

Ключевые слова: разломы, геодинамическая активность, угольные шахты, микросейсмическое зондирование, микросейсмический регистратор, амплитудно-частотный спектр.

of the rock mass in a state of horizontal compression or stretching by microseismic radiation in the zone of dynamic influence of faults.

This paper presents the results of experimental research on the equipment development and obtained data processing of the microseismic sounding method during experimental work on the assessment of geodynamic activity, gas content and time changes in the geophysical fields of tectonic faults in the mines of Donbass for efficient and safe coal mining within the framework of the state assignment No. FRSR-2026-0006. Special attention is paid to the development of methods for analyzing microseismic spectra recorded by various modifications of the SM-3KV seismic sensors.

Key words: tectonic faults, geodynamic activity, coal mines, microseismic sounding, microseismic recorder, amplitude-frequency spectrum.

Введение

Работы по изучению угольных месторождений Донбасса с помощью сейсморазведки были начаты еще в 1970-х годах. Основанием для их развития стало то, что разрывные нарушения пластов с относительным смещением блоков пород величиной менее 10 м практически не выявляются данными разведочного бурения. При изучении кернового материала помимо тектонического строения производится оценка трещиноватости горных пород и выделение систем трещин, но при наклонном залегании пород разрешающая способность геологоразведки существенно падает [1, 2].

Непредвиденное вскрытие коллекторов метана при проведении подземных работ на шахтах в горном массиве приводит к внезапным выбросам газа и авариям. Малозатратным геофизическим методом поиска скоплений метана является мониторинг низкочастотного сейсмического фона, который позволяет исследовать пространственные характеристики газоносных трещинных структур. Это возможно благодаря тому, что спектр естественного низкочастотного сейсмического фона тектонических структур с дизъюнктивной нарушенностью в зонах динамического влияния разломов существенно отличается от спектра относительно однородных ненарушенных участков породы [3].

Перспективным геофизическим методом поиска скоплений метана является мониторинг низкочастотного сейсмического фона (микросейсмика), который позволяет оценить напряженно-деформированное состояние углепородного массива, а также исследовать динамику образования и пространственные характеристики газоносных трещинных структур [4]. Это возможно благодаря тому, что амплитудно-частотная характеристика (спектр) (АЧХ) естественного сейсмического фона в частотном диапазоне 0,05 – 20 Гц для геологических структур, содержащих газ, существенно отличается от спектра структур, вмещающих воду. Тем более существенные отличия в спектрах появляются над областью горных выработок за счет большого количества искусственных пустот в толще пород. Кроме этого, микросейсмические исследования позволяют выявлять закономерности проявления и источники сейсмичности в условиях сильных техногенных помех, исходящих от наземного и подземного оборудования [5].

Датчики микросейсмических колебаний и сейсмостанции регистрируют низкоамплитудные сигналы в низкочастотном диапазоне [6]. В качестве сейсмоприемников чаще всего используют достаточно чувствительные широкополосные датчики с малым уровнем собственных шумов. При этом микросейсмические записи упругих колебаний горных пород «зашумлены» всевозможными помехами природного и техногенного происхождения, что затрудняет выделение как нормального фона, так и малоамплитудных сигналов и определение их частот.

Аппаратура для исследований

Датчик сейсмических сигналов – это сейсмоприемник, преобразующий вертикальную или горизонтальную составляющую вектора упругих колебаний земной поверхности в электрический сигнал. Сейсмоприемник фиксирует форму и время прихода волны, что позволяет вычислить ее частоту, амплитуду и другие параметры. Для записи данных с датчиков используются регистраторы в одноканальном [7], многоканальном [8, 9] или модульном [10] исполнении. Количество аналоговых каналов, диапазон частот дискретизации, динамический диапазон и другие параметры сейсмостанции зависят от ее назначения, т.е. вида проводимого геофизического исследования (активная сейсморазведка или пассивный микросейсмический мониторинг).

Для пассивного микросейсмического (сейсмологического) мониторинга существует тенденция построения универсальных автономных сейсмических регистраторов с возможностью выбора количества каналов и параметров записи данных [11]. Наиболее важным параметром сейсмостанции является ее динамический диапазон, который определяется не только разрядностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), но и характеристиками аналогового тракта усиления и фильтрации низкоамплитудных сигналов с датчиков. В случае использования низкочастотных широкополосных сейсмоприемников их выходной сигнал находится в диапазоне частот $0,001 \div 100$ Гц, что создает ряд затруднений при проектировании схем усиления, фильтрации и аттенюации при обработке сигналов датчиков перед АЦП.

Поэтому к аналоговому тракту микросейсмических регистраторов предъявляются жесткие требования по уровню шумов и линейности АЧХ при выбранном значении аттенюации и коэффициенте усиления. Тип и порядок фильтров низких частот также имеет большое значение, поскольку в качестве сейсмоприемников используют высокочувствительные широкополосные датчики с малым уровнем собственных шумов.

Например, чувствительность маятниковых сейсмоприемников типа СМ-3КВ находится на уровне 300 В/(м/с) при пороге чувствительности $1,25 \cdot 10^{-10}$ м/с в диапазоне частот $0,5 \div 20$ Гц. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики некоторых сейсмоприемников, используемых совместно с сейсмическими регистраторами.

Таблица 1

Основные параметры некоторых сейсмоприемников

Параметр	Тип датчика				
	GS-ONE	СМЕ-4211	СМЕ-4311 СМЕ-6111	STS-25	СМ-3КВ
Чувствительность, В/(м/с)	89	2000	2000	1500	300
Частотный диапазон, Гц	4,5 – 120	0,033 – 50	0,0083 – 50	0,0027 – 50	0,5 – 100
Интегральный шум, мкВ	-	57,8 – 152	18 – 71,2	-	< 0,037

На основании многолетнего опыта проектирования сейсмостанций в отделе геофизических исследований в ФГБНУ «РАНИМИ» (г. Донецк) создан 3-канальный автономный регистратор низкочастотных малоамплитудных сейсмических сигналов [12], структурная схема которого приведена на рис. 1.

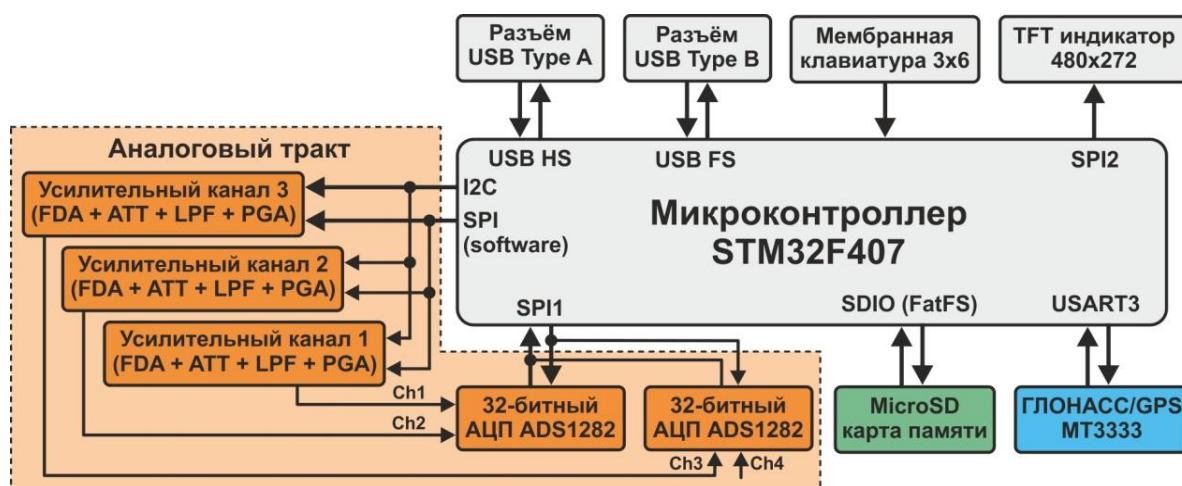


Рис. 1. Структурная схема микросейсмического регистратора на ARM микроконтроллере: FDA – дифференциальный усилитель (Fully Differential Amp); ATT – аттенюатор (Attenuator); LPF – фильтр низких частот (Low Pass Filter); PGA – усилитель с программируемым коэффициентом усиления (Programmable Gain Amplifier)

Для опытно-методических полевых работ было изготовлено несколько экспериментальных образцов. В схеме микросейсмического регистратора (сейсмостанции) использован высокопроизводительный микроконтроллер (МК) с 32-битным ARM ядром. Запись данных производится на карту памяти microSD, файловая система реализована посредством библиотеки FatFS. Сейсмостанция ориентирована на длительную автономную работу (суточный и недельный мониторинг), максимальная длительность записи данных зависит от текущих настроек и объема карты памяти. Синхронизация внутренних таймеров МК при одновременной работе многих регистраторов осуществляется с помощью микросхемы ГЛОНАСС/GPS приемника, чему посвящена отдельная статья авторов [13].

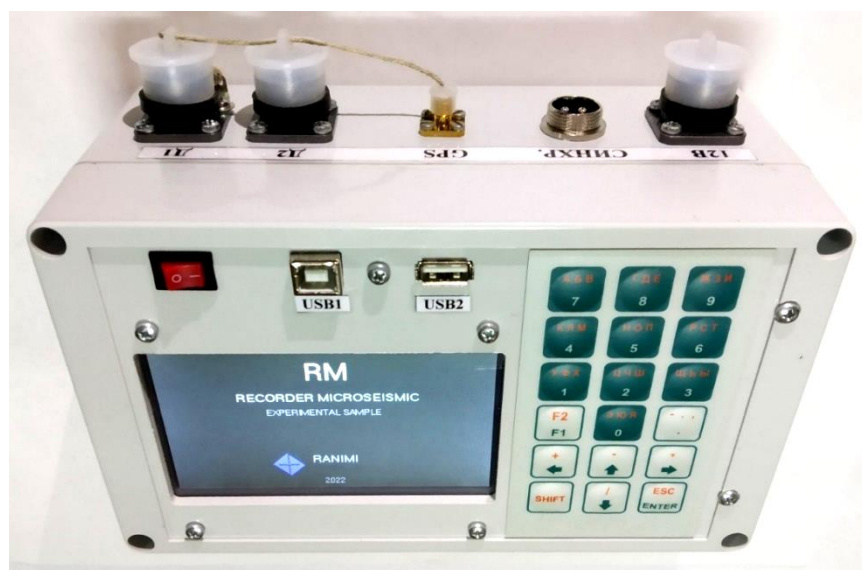


Рис. 2. Микросейсмический регистратор, разработанный в ФГБНУ «РАНИМИ»

Регистратор (рис. 2) предназначен для использования с перечисленными выше низкочастотными трехкомпонентными датчиками микросейсмических сигналов с аналоговым выходом. Данный прибор является переносной аппаратурой общего применения

с электропитанием от внутренней аккумуляторной батареи. При необходимости регистрации микросейсмических сигналов на протяжении нескольких часов или суток к разъему «12В» регистратора подключают внешний аккумулятор достаточной емкости. Подключение и замена отработанного внешнего аккумулятора на новый не нарушает работу регистратора. Возможность переподключения аккумулятора в режиме «горячей замены» позволяет не прерывать процесс регистрации при многосуточных наблюдениях.

Управление всеми режимами и параметрами регистратора выполняется оператором, посредством клавиатуры и дисплея, расположенных на корпусе. Запись зарегистрированных данных производится в энергонезависимую память (microSD карту). Визуализация сигналов на цветном дисплее позволяет делать предварительный анализ принимаемых данных.

Регистратор имеет два входа для датчиков «Д1» и «Д2», каждый из которых реализует три независимых канала усиления и оцифровки. Первый ориентирован на пассивные геофоны типа GS-ONE или СМЗ-КВ. Второй предназначен для датчиков, требующих напряжения питания – это молекулярно-электронные датчики или пьезоэлектрические сейсмоприемники.

К разъему «GPS» подключается антенна GPS900-1 для приема сигналов со спутниковых группировок глобального позиционирования GPS/ГЛОНАСС. Определение координат места и синхронизация по времени выполняется по сигналам GPS.

Во время полевых работ при отсутствии возможности приема сигналов от спутников в зонах расположения группы регистраторов, закрытых для приема GPS сигналов, можно обеспечить синхронную работу нескольких регистраторов во времени с помощью синхросигнала, подаваемого на разъемы «СИНХР» от внешнего блока синхронизации.

Разъем «USB1» типа USB-B используется для подключения компьютера (регистратор находится в режиме Slave), а разъем «USB2» типа USB-A – для подключения внешнего накопителя, например, флэш-накопителя с USB (регистратор находится в режиме Master). Данные регистрируемых сигналов можно снимать в поле USB флэш-накопителем или по окончании измерений в месте обработки данных непосредственным подключением регистратора к компьютеру.

Корпус регистратора изготовлен из сверхпрочного АБС-пластика и обеспечивает защиту от пыли и влаги. Внутри корпуса расположены аккумуляторный блок с платой защиты от недопустимого низкого разряда и перезаряда аккумуляторов; плата питания с интерфейсами и модулем GPS; плата аналого-цифрового преобразования с усилителями, фильтрами, аттенюаторами, преобразователями напряжения питания, микросхемами АЦП разрядностью в 31 бит; процессорная плата на основе STM32 с microSD; плата-переходник для подключения клавиатуры и плата-переходник для подключения цветного дисплея.

Методы исследований

Для анализа геодинамических явлений при формировании аномальных скоплений метана на угольных шахтах в приразломных зонах на поле шахты «Калиновская-Восточная» проводились сейсмические исследования с использованием методов активной сейсморазведки и непрерывного пассивного микросейсмического мониторинга [14]. Далее в работе приведен анализ массива данных, полученных пассивным способом наблюдений в 2024 – 2025 годах по профилям, заданным вкрест простирания надвигов Тимошенко и Французского на поле шахты «Калиновская-Восточная».

Опытные сейсмические пассивные наблюдения проводились с использованием разработанных сейсмостанций и датчиков СМ-3КВ, в том числе и смонтированных на шасси системы Гальперина (рис. 3), расположенных на точках зондирования МС (рис. 4) и ориентированных строго по вертикали (компонента Z), северу (North) и востоку (East). Расположение на местности точек МС выбиралось с учетом минимального воздействия на результаты наблюдений техногенных факторов и близости известных геологоразведочных скважин. Все сейсмические работы проводились в течение нескольких часов в дневное время.



Рис. 3. Устройство пунктов микросейсмических наблюдений с датчиками СМ-3КВ на поле шахты «Калиновская-Восточная»

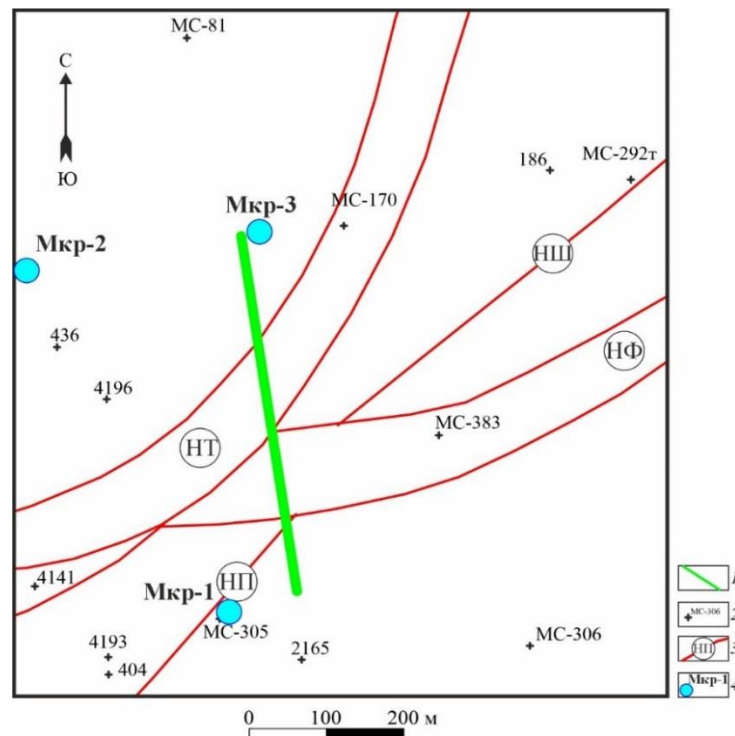


Рис. 4. Расположение сейсморазведочного профиля и пунктов микросейсмических наблюдений:
1 – линия сейсмометрических наблюдений; 2 – устье геологоразведочной скважины, ее номер;
3 – линия выхода разрывного нарушения под наносы;
4 – пункт микросейсмических наблюдений.

Разрывные нарушения: НП – надвиг Промежуточный, НШ – надвиг Шахтный, НТ – надвиг Тимошенко, НФ – надвиг Французский

По результатам проведенных полевых геофизических исследований на поле шахты «Калиновская-Восточная» методами пассивной сейсморазведки установлено, что записи пассивных сейсмических сигналов разными датчиками соответствуют классическим представлениям о формах и амплитудах микросейсмического сигнала. Характерный глобальный пик между 0,1 ÷ 0,3 Гц и провал спектра в диапазоне частот от 0,7 до 1,4 Гц является общим для разных регионов, в том числе и для Донбасса [15 – 17].

На рис. 5 показана суточная трехкомпонентная запись микросейсмических колебаний на поверхности шахты «Калиновская-Восточная», зашумленная техногенными помехами. Выделенная на рис. 5 вертикальная область длительностью всего один час содержит как информативную составляющую естественного микросейсмического поля, так и случайные всплески техногенного происхождения с амплитудами существенно выше нормального фона.

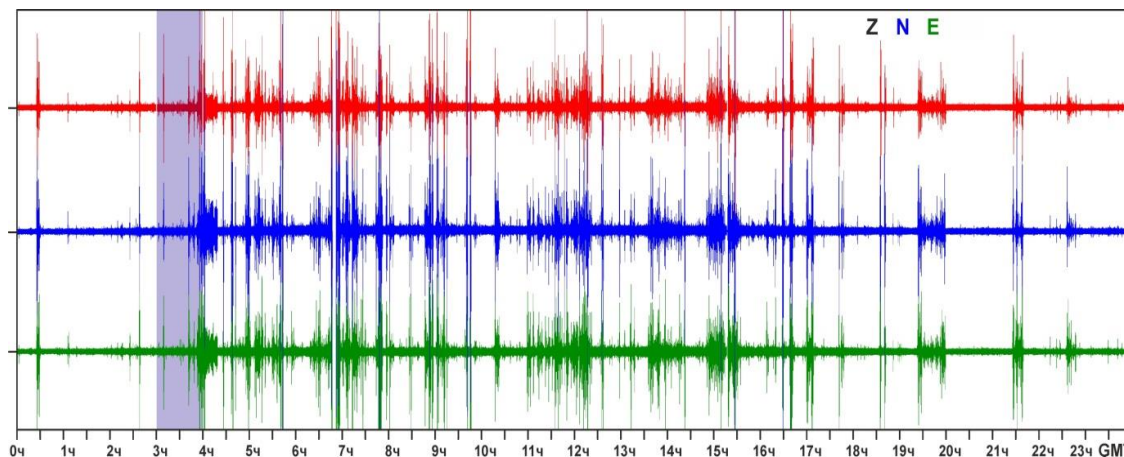


Рис. 5. Трехкомпонентная запись микросейсмических колебаний на пункте наблюдения, зашумленная техногенными помехами

Для достоверного выделения фоновых значений помимо низкочастотной фильтрации высокоамплитудных помех применяют специальные методы цифровой обработки данных – это статистическое усреднение спектров или различные морфологические подходы [18, 19].

Усреднение амплитудных спектров

Один из подходов – это усреднение амплитудных спектров сигналов, когда запись разделяется на блоки, для каждого из которых с использованием преобразования Фурье вычисляются и усредняются единичные амплитудные спектры [20, 21]. Тогда с ростом длины записи микросейсмического шума спектры сглаживаются, но при достижении определенного числа блоков (предела усреднений) спектры не меняются. На рис. 6 показан типовой усредненный спектр одного из пунктов микросейсмических наблюдений на территории шахты «Калиновская-Восточная».

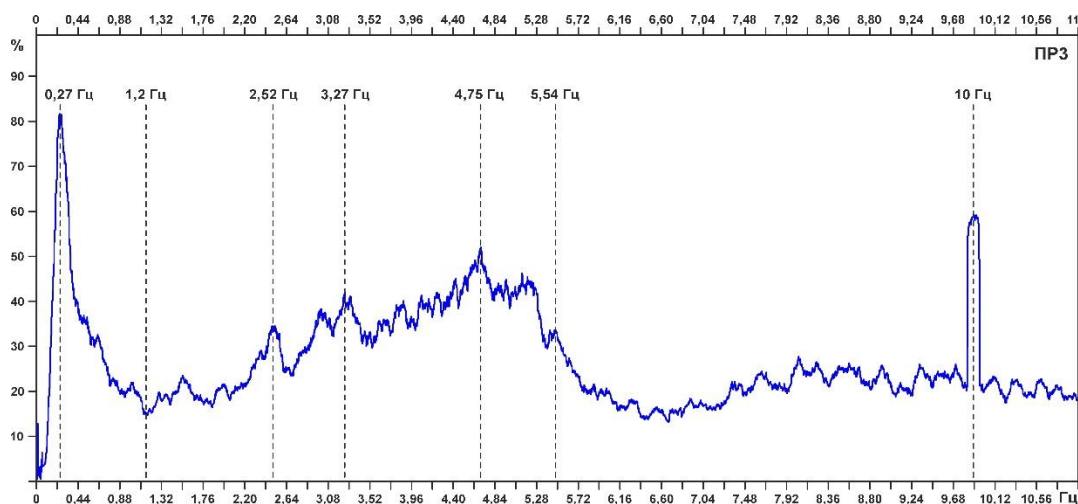


Рис. 6. АЧХ вертикальной составляющей микросейсмического сигнала на территории шахты «Калиновская-Восточная»

Результаты исследований и их обсуждение

В практике поверхностных наблюдений микросейсм соотношение сигнал/шум много меньше единицы из-за интенсивных объемных и поверхностных волн, источником которых являются транспорт и технологическое оборудование. Хотя во время предобработки данных пассивного мониторинга частотный анализ позволяет отфильтровать данные гармонические сигналы, проблемным остается выделение и локализация на фоне естественного шумового фона низкоэнергетических событий, порождаемых разломами и коллекторами метана. Установлено, что поверхностные волны от заглубленных источников формируются в верхней части разреза в результате интерференции на многослойной структуре пачек и представляют собой сложные колебания различной природы, но основной составляющей являются волны Рэлея разной частоты [22, 23].

Для достоверного выделения фоновых значений естественных микросейсм разработан алгоритм усреднения амплитудных спектров сигналов с вычислением и усреднением мгновенных амплитудных спектров. Хотя такая предобработка данных пассивного мониторинга позволяет отфильтровать паразитные квазигармонические сигналы, проблемным остается выделение и локализация на фоне естественного шумового фона низкоэнергетических событий.

Заключение

Установлено, что существует зависимость между скоростями упругих волн (сейсмической жесткостью массива) и амплитудами спектра на разных частотах. Благодаря этому становится возможным выделение нормальной составляющей микросейсмического поля, в спектрах которого прослеживается корреляция с шахтными выработками или же отдельными участками трещиноватости пород в приразломных зонах.

На рис. 7 показаны восстановленные АЧХ микросейсмического фона, полученные при обработке многочасовых наблюдений в разных точках шахтного поля. Видно, что отчетливая характеристика протяженных аномалий проявляется в диапазоне частот 2 – 4 Гц. В более низкочастотной области 0,5 – 2 Гц, как и в более высокочастотной 4 – 30 Гц, поведение семейств АЧХ повторяется.

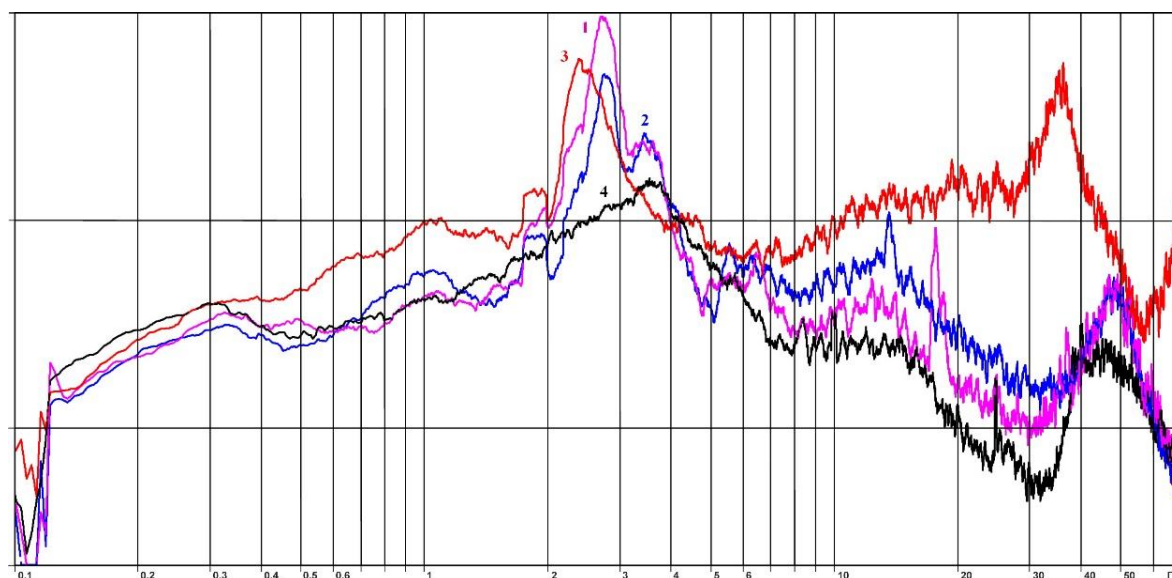


Рис. 7. Восстановленные АЧХ микросейсмических сигналов естественного фона на границах подработанного углепородного массива и тектонического разлома (кривые 1 – 3).

АЧХ микросейсмического фона ненарушенного участка массива вдали от регионального надвига (кривая 4)

Список литературы

1. Анциферов А.В., Тиркель М.Г., Хохлов М.Т. и др., 2004. *Газоносность угольных месторождений Донбасса*. Монография. Киев: Наукова думка, 232 с.
2. Анциферов А.В., 2003. *Теория и практика шахтной сейсморазведки*. Донецк, 312 с.
3. Горбатиков А.В. и др., 2008. Технология глубинного зондирования земной коры с использованием естественного низкочастотного микросейсмического поля. *Изменение окружающей среды и климата*: монография. Т.1. Ч.2. Москва: ИФЗ РАН, С. 223-236.
4. Иванов Л.А., Туманов В.В., Савченко А.В., 2022. Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 16-17 (31-32)*, С. 46-59.
5. Анциферов А.В., Туманов В.В., Новгородцева Л.А., Мартынов Г.П., Бородин Д.С., Ялпуга Е.А., 2023. Помехи и шумы микросейсмических сигналов на примере мониторинговых наблюдений в Донбассе. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 22-23 (37-38)*, С. 137-147.
6. Райфельд М.А., Соколова Д.О., Спектор А.А., 2016. Пассивная сейсмическая локация: аппаратное и базовое программное обеспечение. *Вычислительные технологии: журн. ФИЦ ИВТ СО РАН*, Новосибирск. Т. 21, № 1, С. 116-126.
7. Шмыков А.Н., Сагайдачная О. М., Сальников А.С., Вершинин А.В., 2018. Автономный одноканальный сейсмический регистратор для выполнения наземно-подземных исследований. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 4, С. 204-210.
8. Туманов В.В., Мартынов Г.П., 2017. Развитие автономного аппаратно-аналитического комплекса ААК12 для шахтной сейсморазведки. *50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли: сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф.* Москва: ИПКОН РАН, С. 251 – 254.
9. Анциферов А.В., Камбурова Л.А., Туманов В.В., Мартынов Г.П., Гладков А.Ю., Балакин Ю.А., 2021. Модульная шахтная сейсморазведочная станция. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 8, № 2, С. 7-12.
10. Бутырин П.Г., 2021. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Пять лет развития. *Российский сейсмологический журнал*, Т. 3, № 3, С. 84-94.
11. Анциферов А.В., Туманов В.В., Мартынов Г.П., Горбунов И.Э., Молошникова Н.Б., Деговцов И.В., Сафин А.А., 2022. Сейсмометры и регистраторы низкочастотных малоамплитудных сейсмических сигналов. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 16-17 (31-32)*, С. 18-32.
12. Туманов В.В., Мартынов Г.П., Молошникова Н.Б., Деговцов И.В., Горбунов И.Э., Сафин А.А., 2023. Регистратор микросейсм. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 20-21 (35-36)*, С. 27-32.
13. Мартынов Г.П., Грицаенко А.Ю., Донченко Э.В., Молошникова Н.Б., 2024. Синхронизация геофизической аппаратуры на микропроцессорах с микросекундной точностью. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, № 2 (40)*, С. 123-134.
14. Мартынов Г.П., Туманов В.В., Грицаенко А.Ю., Бородин Д.С., 2024. Анализ пассивных и активных сейсмических наблюдений на поле шахты «Калиновская-Восточная». *Труды РАНМИ: сб. науч. тр., Донецк, Т.1, № 3 (41)*, С. 232 – 245.
15. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахов Е.В., 2008. *Исследования активности платформенных территорий с использованием микросейсм*. Екатеринбург: УрО РАН. 128 с.
16. Надежка Л.И., Орлов Р.А., Пивоваров С.П., Сафронич И.Н., М.А. Ефременко, 2003. О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинамическими особенностями воронежского кристаллического массива. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*, № 2, С. 179–185.
17. Орлов Р.А., 2011. Опыт использования микросейсмического шума для реше-

ния геологических задач в условиях платформы (на примере Воронежского кристаллического массива). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*, № 1, С. 184–192.

18. Азаров А.В., Сердюков А.С., 2023. Комплекс программ обработки данных микросейсмического мониторинга разработки месторождений полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 2, С. 58-71.

19. Сафронич И.Н., 2023. Выделение нормальной и аномальной составляющей сейсмического поля на урбанизированных территориях. *Материалы II Международной научно-практической конференции «Куражковские чтения»*. Астрахань, С. 397-401.

20. Сафронич И.Н., Красилов С.А., Колесников С.И., Савенков А.В., 2013. Повышение эффективности использования процессора обработки сигналов программы WSG в научно-исследовательской работе. *Сборник материалов Восьмой Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных»*. Обнинск, С. 372-385.

21. Сафронич И.Н., 2022. Использование спектра Накамуры для зондирования пород в кровле докембрийского фундамента. *Сборник статей III Международного научно-исследовательского конкурса «Лучший исследовательский проект 2022»*. Петрозаводск, С. 114-124.

22. Данилов К.Б., 2017. *Выявление геологических неоднородностей в верхней части земной коры на основе анализа низкочастотных микросейсм (на примере Архангельской области)*: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10. Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Академика Н.П. Лаверова. Архангельск, 181с.

23. Горбатиков А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Кошевой Н.Г., Андреева Н.В., Цуканов А.А., Шманатов Г.В., Мерзлякин Т.И., 2025. Исследование глубинного строения и тектоники северного склона Большого Кавказа и западной части Терско-Каспийского прогиба по результатам микросейсмического зондирования. *Геология и геофизика Юга России*, № 15(2), С. 87–102.

References

1. Antsiferov A.V., Tirkel' M.G., Khokhlov M.T. i dr., 2004. Gazonosnost' ugol'nykh mestorozhdenii Donbassa [Gas content of Donbass coal deposits]. Monografiya. Kiev: Naukova dumka, 232 p.

2. Antsiferov A.V., 2003. Teoriya i praktika shakhtnoi seismorazvedki [Theory and practice of mine seismic engineering]. Donetsk, 312 p.

3. Gorbatikov A.V. i dr., 2008. Tekhnologiya glubinnoho zondirovaniya zemnoi kory s ispol'zovaniem estestvennogo nizkochastotnogo mikroiseismicheskogo polya [Technology of deep sounding of the Earth's crust using a natural low-frequency micro-seismic field]. *Izmenenie okruzhayushchei sredy i klimata: monografiya*. Vol.1. Ch.2. Moscow: IFZ RAN, P. 223-236.

4. Ivanov L.A., Tumanov V.V., Savchenko A.V., 2022. Strukturno-geodinamicheskie predposylki ispol'zovaniya mikroiseism dlya poiska anomal'nykh skoplenii metana [Structural and geodynamic prerequisites for using microseisms to search for anomalous methane accumulations]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr.*, Donetsk, № 16-17 (31-32), P. 46-59.

5. Antsiferov A.V., Tumanov V.V., Novgorodtseva L.A., Martynov G.P., Borodin D.S., Yalputa E.A., 2023. Pomekhi i shumy mikroiseismicheskikh signalov na primere monitoringovykh nablyudenii v Donbasse [Interference and noise of microseismic signals on the example of monitoring observations in Donbass]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr.*, Donetsk, № 22-23 (37-38), P. 137-147.

6. Raifel'd M.A., Sokolova D.O., Spektor A.A., 2016. Passivnaya seismicheskaya lokatsiya: apparatnoe i bazovoe programmnoe obespechenie [Passive seismic location: hardware and basic software]. *Vychislitel'nye tekhnologii: zhurn. FITs IVT SO RAN*, Novosibirsk.

Vol. 21, № 1, P. 116-126.

7. Shmykov A.N., Sagaidachnaya O. M., Sal'nikov A.S., Vershinin A.V., 2018. Avtonomnyi odnokanal'nyi seismicheskii registrator dlya vypolneniya nazemno-podzemnykh issledovaniy [Autonomous single-channel seismic recorder for performing surface-underground research]. *Interesko Geo-Sibir'*, Vol. 4, P. 204-210.

8. Tumanov V.V., Martynov G.P., 2017. Razvitie avtonomnogo apparatno-analiticheskogo kompleksa AAK12 dlya shakhtnoi seismorazvedki [Development of the AAK12 autonomous apparatus and analytical complex for mine seismic exploration]. 50 let Rossiiskoi nauchnoi shkole kompleksnogo osvoeniya nedr Zemli: sb. trudov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Moscow: IPKON RAN, P. 251 – 254.

9. Antsiferov A.V., Kamburova L.A., Tumanov V.V., Martynov G.P., Gladkov A.Yu., Balakin Yu.A., 2021. Modul'naya shakhtnaya seismorazvedochnaya stantsiya [Modular mine seismic survey station]. *Funda-mental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 8, № 2, P.7-12.

10. Butyrin P.G., 2021. Tsifrovoy seismicheskii registrator "Ermak-5". Pyat' let razvitiya [Digital seismic recorder "Ermak-5". Five years of development]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, Vol. 3, № 3, P. 84-94.

11. Antsiferov A.V., Tumanov V.V., Martynov G.P., Gorbunov I.E., Moloshnikova N.B., Degovtsov I.V., Safin A.A., 2022. Seismometry i registry nyzkochastotnykh maloamplitudnykh seismicheskikh signalov [Seismometers and recorders of low-frequency low-amplitude seismic signals]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, № 16-17 (31-32), P. 18-32.

12. Tumanov V.V., Martynov G.P., Moloshnikova N.B., Degovtsov I.V., Gorbunov I.E., Safin A.A., 2023. Registrator mikrozeism [Microseismic recorder]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, № 20-21 (35-36), P. 27-32.

13. Martynov G.P., Gritsaenko A.Yu., Donchenko E.V., Moloshnikova N.B., 2024. Sinkhronizatsiya geofizicheskoi apparatury na mikroprotssorakh s mikrosekundnoi tochnost'yu [Synchronization of geophysical equipment on microprocessors with microsecond accuracy]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, № 2 (40), P. 123-134.

14. Martynov G.P., Tumanov V.V., Gritsaenko A.Yu., Borodin D.S., 2024. Analiz passivnykh i aktivnykh seismicheskikh nablyudenii na pole shakhty "Kalinovskaya-Vostochnaya" [Analysis of passive and active seismic observations in the field of the Kalinovskaya-Vostochnaya mine]. *Trudy RANIMI: sb. nauch. tr., Donetsk*, Vol.1, № 3 (41), P. 232 - 245.

15. Yudakhin F.N., Kapustyan N.K., Shakhov E.V., 2008. Issledovaniya aktivnosti platformennykh territorii s ispol'zovaniem mikrozeism [Research on the activity of platform territories using microseisms]. *Ekaterinburg: UrO RAN*. 128 p.

16. Nadezhka L.I., Orlov R.A., Pivovarov S.P., Safronich I.N., Efremenko M.A., 2003. O svyazi parametrov seismicheskogo shuma s geologicheskimi i geodinamicheskimi osobennostyami voronezhskogo kristallicheskogo massiva [On the relationship of seismic noise parameters with geological and geodynamic features of the Voronezh crystalline massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, № 2, P. 179–185.

17. Orlov R.A., 2011. Opyt ispol'zovaniya mikrozeismicheskogo 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 (using the example of the Voronezh crystal massif)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, № 1, P. 184–192.

18. Azarov A.V., Serdyukov A.S., 2023. Kompleks programm obrabotki dannykh mikrozeismicheskogo monitoringa razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [A set of programs for processing microseismic monitoring data for mining of mineral deposits]. *Gornyye informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 2, P. 58-71.

19. Safronich I.N., 2023. Vydelenie normal'noi i anomal'noi sostavlyayushchei seismicheskogo polya na urbanizovannykh territoriyakh [Identification of the normal and abnormal components of the seismic field in urbanized areas]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Kurazhkovskie chteniya". Astrakhan'*, P. 397-401.

20. Safronich I.N., Krasilov S.A., Kolesnikov S.I., Savenkov A.V., 2013. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya protsessora obrabotki signalov programmy WSG v nauchno-issledovatel'skoi rabote [Improving the efficiency of using the signal processing processor of the WSG program in research work]. *Sbornik materialov Vos'moi Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh". Obninsk*, P. 372-385.

21. Safronich I.N., 2022. Ispol'zovanie spektra Nakamury dlya zondirovaniya porod v krovle dokembriiskogo fundamenta [Using the Nakamura spectrum to probe rocks in the roof of the Precambrian basement]. *Sbornik statei III Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa "Luchshii issledovatel'skii proekt 2022". Petrozavodsk*, P. 114-124.

22. Danilov K.B., 2017. Vyyavlenie geologicheskikh neodnorodnostei v verkhnei chasti zemnoi kory na osnove analiza nizkochastotnykh mikrozeism (na primere Arkhangel'skoi oblasti) [Identification of geological inhomogeneities in the upper part of the Earth's crust based on the analysis of low-frequency microseisms (using the example of the Arkhangelsk region): dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 25.00.10. Federal'nyi issledovatel'skii tsentr kompleksnogo izucheniya Arktiki im. Akademika N.P. Laverova. Arkhangel'sk, 181p.

23. Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V., Stepanova M.Yu., Koshevoi N.G., Andreeva N.V., Tsukanov A.A., Shmanatov G.V., Merzlikin Vol. I., 2025. Issledovanie glubinnogo stroeniya i tektoniki severnogo sklona Bol'shogo Kavkaza i zapadnoi chasti Tersko-Kaspiiskogo progiba po rezul'tatam mikrozeismicheskogo zondirovaniya [Investigation of the deep structure and tectonics of the northern slope of the Greater Caucasus and the western part of the Tersko-Caspian trough based on the results of microseismic sounding]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, № 15(2), P. 87–102.