

РЕГИСТРАЦИЯ МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО РАЗРУШЕНИЮ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2024 Д.С. Тягунов, А.Ф. Шестаков

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия, 620016;
e-mail: alxsh@mail.ru, tds-07@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2023; после доработки 31.08.2024; принята в печать 25.09.2024

Представлены результаты наблюдений за вариациями магнитной индукции с использованием магнитомодуляционных датчиков, позволивших осуществить регистрацию сигналов электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне 0.01–200 Гц, генерируемого образцами горных пород при быстром и медленном одноосном их нагружении в лабораторных экспериментах. Приведено описание аппаратуры и методики измерений, используемых для проведения экспериментов. При двух режимах нагружения образцов горных пород обнаружены различия в сигналах ЭМИ, отражающие особенности развития процессов их разрушения. Показано, что при развитии процессов разрушения испытываемых образцов, в амплитудно-частотном спектре магнитных составляющих поля отчетливо выявляется вклад низкочастотных гармоник, который преимущественно сконцентрирован в области частот ниже 15 Гц. Установлено, что магнитомодуляционные датчики имеют достаточную чувствительность и разрешающую способность для наблюдения и регистрации сигналов ЭМИ в диапазоне частот 0.01–200 Гц, проявляемого при разрушении образцов горных пород в процессе их нагружения.

Ключевые слова: разрушение образцов горных пород, электромагнитное излучение, магнитная индукция.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно широко проводятся экспериментальные исследования по изучению электромагнитного излучения (ЭМИ), регистрируемого в процессе трещинообразования и разрушения образцов горных пород и различных материалов под воздействием внешней нагрузки (Вострецов и др., 2018; Курленя и др., 2000; Лось и др., 2010; Потокин, Пак, 2020 и др.).

В петрофизике горная порода описывается как «геологическое тело сложного полиминерального состава» с неоднородностями, отличающимися по фазовому, компонентному (минеральному) составу, а также текстурно-структурными особенностями строения (Добрынин и др., 2004). В условиях внешних воздействий минеральная система, образованная твердой (скелет породы), жидкой и газообразной фазами, начинает деформироваться, что приводит к смещению фаз относительно друг друга с образова-

нием дислокаций и микротрещин, которые могут совершать колебательные движения, сопровождаемые акустическими и электромагнитными явлениями (Поляшов, 2010).

Источником ЭМИ и акустической эмиссии (АЭ) в горных породах является область, в которой возникает и развивается процесс трещинообразования и разрушения в результате изменения напряженно-деформированного состояния массива, что позволяет их считать индикаторами этого процесса, а также одними из возможных предвестников наступления критических геодинамических событий (горные удары и землетрясения). В этой связи, является актуальным изучение характеристик ЭМИ и АЭ, возникающих при физическом моделировании процесса разрушения на образцах горных пород в лабораторных экспериментах.

Информацию об изменении структурных характеристик горной породы, подвергнутой внешнему воздействию в виде нагружения,

получают, как правило, в результате измерений сигналов АЭ или ЭМИ, регистрируемых с использованием магнитных антенн, выполненных на ферритовых сердечниках стержневой или тороидальной конструкции, а также емкостных датчиков напряженности электрического поля (Кулаков, Бритков, 2001; Кулаков и др., 1997; Курленя и др., 1994; Тимоненков, Яковицкая, 2000).

В публикациях отечественных и зарубежных исследователей предлагается ряд моделей и механизмов для объяснения природы электромагнитных эффектов, обусловленных разрушением горных пород, а также способов регистрации возникающего при этом ЭМИ. Так, например, в работе (Курленя и др., 1991) выявлены характерные особенности спектров ЭМИ, возникающего при нагружении и разрушении образцов горных пород, а также особенности изменения частоты, соответствующей максимуму спектральной плотности сигнала. Установлена стадийность этого изменения от высокочастотного диапазона на начальном этапе нагружения и накопления дефектов в образце к смещению максимума в область более низких частот по мере роста нагрузки и снова в высокочастотную область на этапе разрушения. Эта характерная особенность описывается так называемой S-образной кривой (диаграммой) максимальных значений спектральной составляющей сигнала в зависимости от частоты.

В работе (Кулаков, Яковицкая, 1994) на образцах горных пород и руд (мраморный известняк, магнетитовая руда, сиенит) Таштагольского рудного месторождения, расположенного в Кемеровской области, в 200 км к юго-востоку от г. Новокузнецк, проведен анализ последовательности перемещения максимальных спектральных составляющих сигналов по спектрально-временной матрице по мере роста нагрузки. В условиях одноосного сжатия этих образцов сигналы ЭМИ регистрировались с использованием магнитных датчиков в виде стержневых и тороидальных узконаправленных антенн, размещаемых вблизи испытуемых образцов. В результате экспериментов установлено, что наибольшие по амплитуде импульсы излучения возникают на звуковых частотах (до первых сотен Гц) и приурочены к моменту лавинного разрушения образца с «потерей сплошности».

В работе (Вострецов и др., 1997) сигналы ЭМИ регистрировались с применением направленной ферритовой антенны, которая использовалась при записи амплитуд импульсов напряжения в процессе нагружения образцов из гранита, мрамора, алевролита и аргиллита. При этом отмечается устойчивая регистрация сигналов в высокочастотной области от 4 до 120 кГц. При анализе спектров сигналов ЭМИ также получена

S-образная диаграмма, на которой выделяются области максимальных спектральных амплитуд при накоплении трещин, формировании зоны магистральной трещины и последующего ее прорастания на этапе нарушения сплошности образца.

Изучение процессов разрушения на образцах горных пород на основе комплексных измерений АЭ и ЭМИ в последнее время продолжает активно развиваться (Беспалько и др., 2008, 2009; Лось и др., 2010; Потокин, Пак, 2020). Разработана и совершенствуется различная аппаратура для регистрации, как АЭ, так и ЭМИ, проявляющихся в элементах напряженности электрического поля (Вострецов и др., 2018; Кривецкий, Бизяев, 2010; Мешков и др., 2022; Потокин, Пак, 2020). Однако, подавляющее большинство аппаратурных разработок позволяет регистрировать элементы напряженности магнитной или электрической компонент излучаемого электромагнитного поля, преобразованные в электрические сигналы преимущественно в высокочастотном диапазоне от 0.5 кГц до 3 МГц.

Кроме того, как отмечают В.Ф. Лось с соавторами (2010), при нагружении образцов горных пород в них возникают зоны с различным напряженно-деформированным состоянием, приводящее к мозаичному распределению электрических зарядов в объеме образца, а перераспределение напряжений в образце ведет к миграции этих зарядов. При этом, до полного разрушения образца выделяют четыре стадии: накопление микротрещин, момент формирования зоны магистральной трещины, прорастание магистральной трещины и разрушение. Согласно работе (Мулев и др., 2019) во время разрушения образцов горных пород различного состава, электрические диполи, создаваемые на поверхностях трещин этих образцов, являются источниками ЭМИ вне зависимости от химической или минералогической структуры образцов или режима приложения нагрузки.

В монографии В.В. Суркова (2000) приводится подробный обзор различных гипотез возникновения электромагнитных эффектов, связанных с разрушением горных пород, в том числе при проведении лабораторных экспериментов. При этом, большинство анализируемых в монографии публикаций по этой теме посвящено возникновению электромагнитного поля радиочастотного диапазона, генерируемого трещинами, образующимися в процессе внешней нагрузки образцов, приводящего к их разрушению. Отмечается, что в ряде случаев наблюдается синхронность регистрируемых высокочастотных сигналов ЭМИ и АЭ в процессе разрушения материалов, что может быть вызвано единым источником их генерации, связанным

с образованием микротрещин отрыва, их прорастианием и последующим объединением в магистральные трещины.

Однако подобная корреляция наблюдается не всегда (Yamada et al., 1989), и отмечается более позднее возникновение сигналов АЭ по сравнению с ЭМИ в процессе нагружения образцов до их полного разрушения. В ряде случаев наблюдается генерация широкополосного электрического поля в звуковом диапазоне частот. Так, например, в работе (Ogawa et al., 1985) при одноосном нагружении гранитов был зарегистрирован широкополосный шумовой сигнал с частотой порядка 10 Гц после относительно регулярных осцилляций электрического потенциала в диапазоне 4–5 кГц.

В работе (Nadjicontis, Mavromatou, 1994) приводятся результаты экспериментов по обнаружению достаточно интенсивных (до 50 мВ) низкочастотных электрических сигналов (порядка 1–2 Гц), возникающих при одноосном сжатии образцов гранита и известняка. Для описания этого явления предложена дислокационная модель возникновения медленных поляризационных эффектов под воздействием нагрузки, которая приводит к генерации низкочастотного электромагнитного поля.

Поскольку вектора электрического и магнитного переменного электромагнитного поля взаимосвязаны между собой системой уравнений Максвелла (Морс, Фешбах, 1958), то эффект ЭМИ (в том числе низкочастотного) должен проявляться не только в электрических, но также и магнитных сигналах регистрируемых компонент поля.

Таким образом, целью настоящей работы является проведение лабораторных экспериментов по разрушению образцов горных пород в процессе приложения внешней нагрузки для обнаружения низкочастотных сигналов ЭМИ в магнитном поле с использованием магнитомодуляционных датчиков.

Задачей исследования является идентификация и изучение характерных особенностей выявленных сигналов ЭМИ в низкочастотном диапазоне (0.01–200 Гц) на фоне техногенного магнитного шума, генерируемых образцами базальта в процессе их разрушения при двух режимах увеличения внешней нагрузки в условиях одноосного сжатия.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В лабораторных экспериментах измерения проводились магнитометром, в котором в качестве датчиков магнитного поля используется магнитомодуляционный преобразователь магнитной индукции, выполненный на основе

аморфных ферромагнитных сердечников с компенсированной продольной магнитострикцией, работающих в режиме автопараметрического усиления сигнала, разработанный в Институте геофизики (ИГФ) УрО РАН (Сокол-Кутыловский, 2010; Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2007; Sokol-Kutylovskii, 2016).

Как показано в работе (Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2007) величина собственного магнитного шума магнитомодуляционного преобразователя магнитной индукции не превышает 5 пТл \times Гц^{-1/2} в диапазоне частот от 0.1 Гц до 1 кГц. Коэффициент преобразования (чувствительность) составляет 178.5 мВ/нТл. Диапазон частот измеряемого сигнала магнитной индукции 0.01–200 Гц. Аналоговый электрический сигнал с датчиков поступает на 24-х разрядный программируемый аналого-цифровой преобразователь AD7734EBZ, соединенный с переносным компьютером (ноутбук).

Датчики магнитометра, закрепленные на немагнитном штативе, от образцов горных пород располагались на расстоянии ~450 мм. При этом, ориентация датчиков горизонтальной компоненты V_x была направлена по магнитному меридиану, горизонтальной компоненты V_y ортогональна магнитному меридиану, датчик компоненты V_z устанавливался вертикально. Измерения магнитной индукции проводились (от начала увеличения нагрузки на образцы до полного их разрушения) в реальном масштабе времени.

При проведении эксперимента были взяты образцы хлоритизированного базальта, отобранного с Гороблагодатского месторождения, расположенного в г. Кушва Свердловской области. Выбор этих образцов был обусловлен тем, что базальт (как и большинство скальных магматических пород) обладает высоким пределом прочности на одноосное сжатие (Мащенко и др., 2014), а значит, способен хорошо накапливать энергию деформации в процессе внешней нагрузки, перед тем как наступит критическая стадия его хрупкого разрушения, сопровождающаяся ЭМИ.

Для исследований были отобраны образцы кубической формы с ребром 24 мм с целью удобства фиксации в прессе. Нагружение образцов осуществлялось при помощи ручного гидравлического одноосного пресса марки «WK-18» производства фирмы ZARZAD SPRZETU (Польша) с классом точности 0.5, рассчитанного на максимальную нагрузку 100 тонн.

В экспериментах было реализовано два режима увеличения нагрузки на образец горной породы, отличающиеся длительностью проведения. В первом эксперименте увеличение нагрузки происходило относительно быстро, порядка 0.03 МПа в секунду. После фиксации

образца между верхней и нижней плитами гидравлического пресса на образец оказывали непрерывную нагрузку в виде одноосного сжатия, при которой плавно увеличивалось давление от 0 МПа до 3 МПа. При нагружении образца до 0.5 МПа была включена запись регистрации сигналов ЭМИ. Во втором эксперименте был реализован режим медленного увеличения нагрузки с интенсивностью порядка 0.005 МПа в секунду. Нагрузив образец до 1.5 МПа, была включена запись регистрации сигналов ЭМИ и продолжено плавное его нагружение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки амплитудных значений сигналов ЭМИ, проявляемого при трещинообразовании и разрушении образца горной породы вместе с фоновыми его флуктуациями, перед началом эксперимента в лаборатории была проведена регистрация вариаций низкочастотного магнитного шума техногенного происхождения. Измерения фона проводились в интервалах времени с 13⁰⁰ до 17⁰⁰ местного времени на протяжении всей рабочей недели. Указанный интервал был выбран для последующего проведения экспериментов.

В качестве примера представлены записи магнитного шума, зарегистрированные 27 февраля 2024 г. в экспериментальной лаборатории ИГФ УрО РАН (рис. 1). Отметим, что вариации геомагнитного поля во время проводимых экспериментов по наблюдениям магнитной станции

ARTI (расположенной в п. Арти Свердловской области, в 170 км к юго-западу от Екатеринбурга) международной сети INTERMAGNET были незначительными, а их амплитуды по компонентам магнитной индукции не превышали значений: V_x — 30 нТл, V_y — 16 нТл, V_z — 17 нТл (рис. 2) за время проведенных экспериментов.

На записях компонент магнитной индукции (рис. 1) амплитуда техногенного шума V_x составила 20 нТл, V_y — 60 нТл, V_z — 80 нТл. Под фрагментами записей приведены соответствующие им усредненные спектры магнитного шума, на которых хорошо отобразились линии с частотами 50 Гц и ее кратных гармоник, вызванные магнитным полем электрического оборудования промышленной частоты, расположенного в здании ИГФ УрО РАН. Отметим, что амплитуда техногенного шума во всей низкочастотной области спектров, распределена равномерно и составила для V_x и V_z не более ~0.002 нТл, а для V_y , за вычетом вклада от частоты 50 Гц, не более ~0.005 нТл. Указанные уровни амплитуды характеризуют низкочастотный магнитный шум техногенного происхождения, усредненный по времени записи, типичный для конкретного местоположения измерения.

В первом эксперименте в момент начала разрушения образца и перед фрагментальным его разрушением произошли друг за другом три слышимых акустических щелчка, сопровождавшиеся откалыванием фрагментов образца на расстояние порядка 0.5 м от него. При этом давление опустилось с 3 МПа до 0 МПа в момент полного

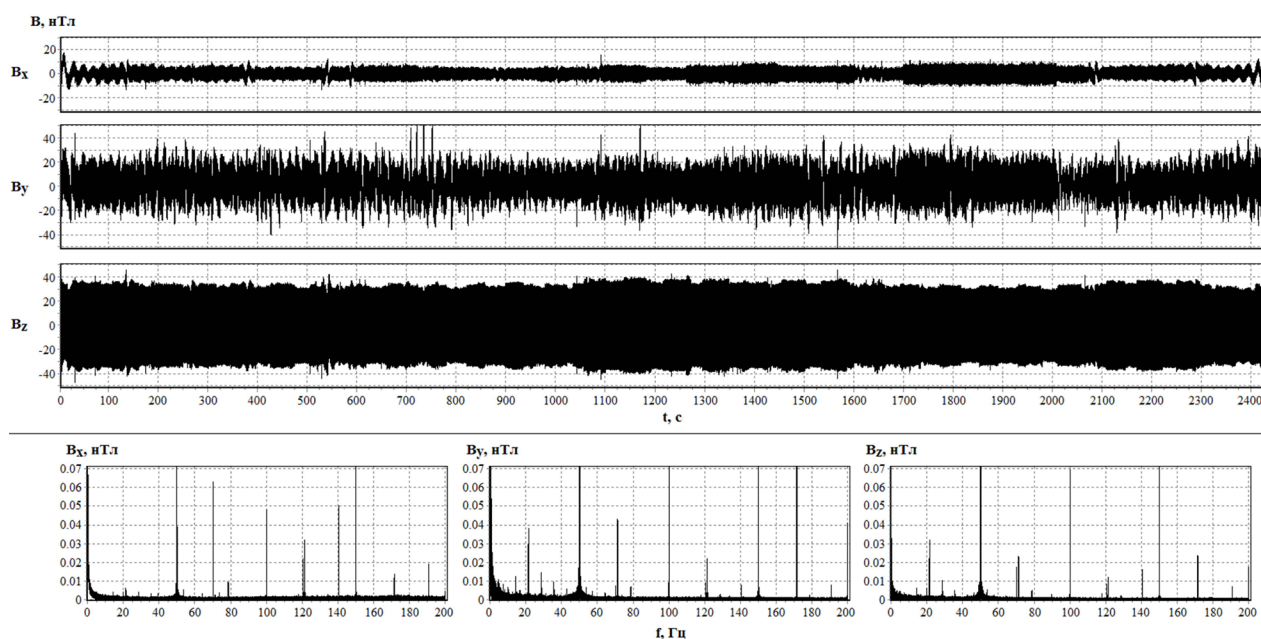


Рис. 1. Фоновые записи компонент техногенного магнитного шума и соответствующие им амплитудно-частотные спектры магнитной индукции.

Fig. 1. Background recordings of technogenic magnetic noise components and their amplitude-frequency spectra of magnetic induction.

разрушения образца. На записях компонент магнитной индукции V_x , V_y , V_z (рис. 3) импульсы ЭМИ высокой амплитуды появились на 98, 101 и 107 с. Таким образом, при непрерывном нагружении образца начальное изменение напряженно-

деформированного состояния проявляется от формирования системы микротрещин и их слияния с образованием магистральной трещины, что нашло отражение в появлении первого импульса (рис. 3). Дальнейшее изменение напряженно-деформированного состояния связано с увеличением зоны прорастания магистральной трещины (второй импульс) и достижения критической нагрузки, приводящей к разрушению образца (третий импульс).

Похожие явления, возникающие при регистрации ЭМИ в высокочастотном радиодиапазоне хорошо известны по публикациям (Соболев и др, 1980; Сурков, 2000), касающихся особенностей сигналов излучения в электрическом и магнитном полях. Согласно цитируемым работам, можно предположить, что один из возможных механизмов генерации импульсов ЭМИ в проведенном эксперименте напрямую связан с процессом трещинообразования на стадии укрупнения и слияния трещин, а также момента полного разрушения образца горной породы. Этот механизм также объясняет возникновение акустических щелчков, сопутствующих возникновению импульсов ЭМИ по времени регистрации.

В рассматриваемом эксперименте можно отметить некоторое подобие формы импульсов на всех компонентах V_x , V_y , V_z .

На последней стадии напряженно-деформированного состояния образца происходит его лавинообразное разрушение, которое связано с быстрым прорастанием магистральных трещин и с соответствующим нарастанием низкочастотной составляющей (табл. 1). Это хорошо видно на амплитудно-частотных спектрах, на которых, начиная с частоты ~ 20 Гц амплитуда спектра смещается из высокочастотной области в низкочастотную (рис. 3). При этом ее значение от 0.05 нТл до 1 нТл и выше возрастает относительно спектральной плотности фона на частотах 14 Гц, 10 Гц, 5 Гц, 1 Гц и 0.5 Гц (рис. 1).

Во втором эксперименте после фиксации образца между верхней и нижней плитами гидравлического пресса образец нагрузили до 0.5 МПа и замерили расстояние между плитами пресса, которое составило 24 мм. Замер расстояния был сделан для оценки влияния подвижной одноосной части пресса на запись результатов измерений.

При нагрузке образца до 2 МПа происходит первый акустический щелчок, и при этом давление остается неизменным. Нагрузив образец до 2.4 МПа, происходит второй щелчок, при котором давление понизилось до 2 МПа. С последующим нагружением до 2.5 МПа, происходит третий щелчок, при котором давление понизилось до 2 МПа. Дальнейшее увеличение нагрузки до 3 МПа порождает четвертый акустический щелчок, при котором давление опустилось

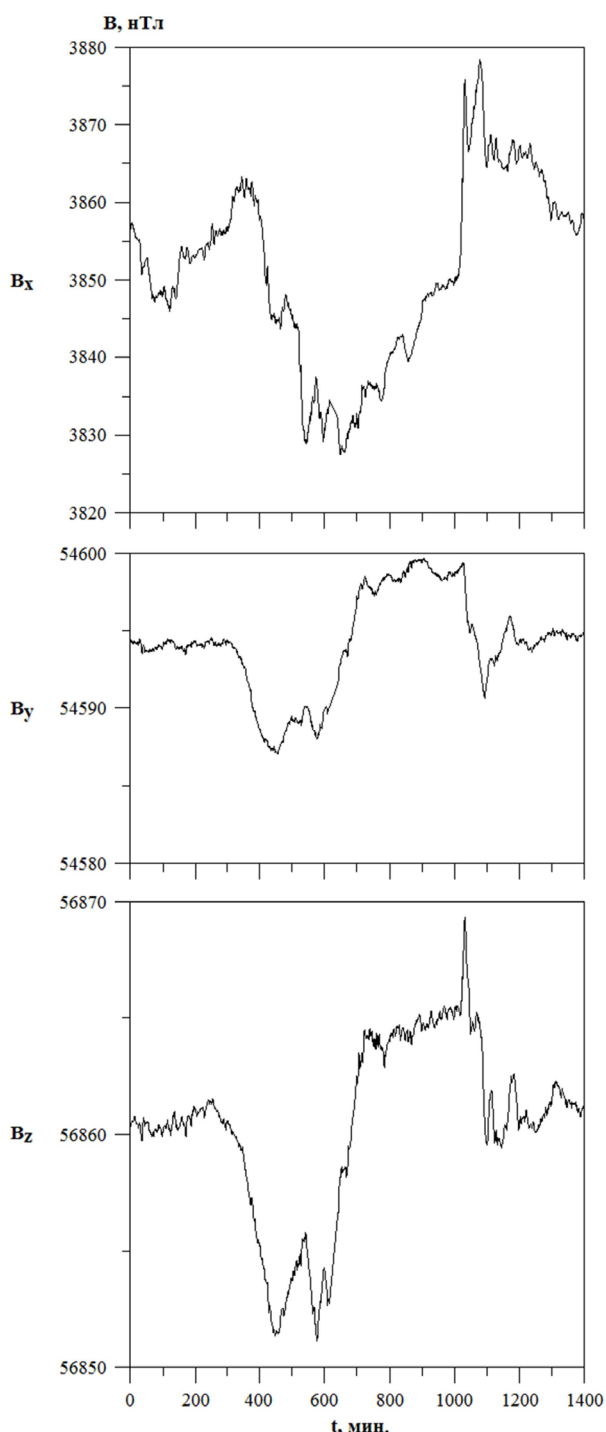


Рис. 2. Фрагменты записей вариаций геомагнитного поля по архивным данным магнитной станции обсерватории АРТИ Института геофизики УрО РАН.

Fig. 2. Fragments of recordings of variations of the geomagnetic field according to archival data from the magnetic station of the ARTI Observatory of the Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

РЕГИСТРАЦИЯ МАГНИТОМОДУЛЯЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ

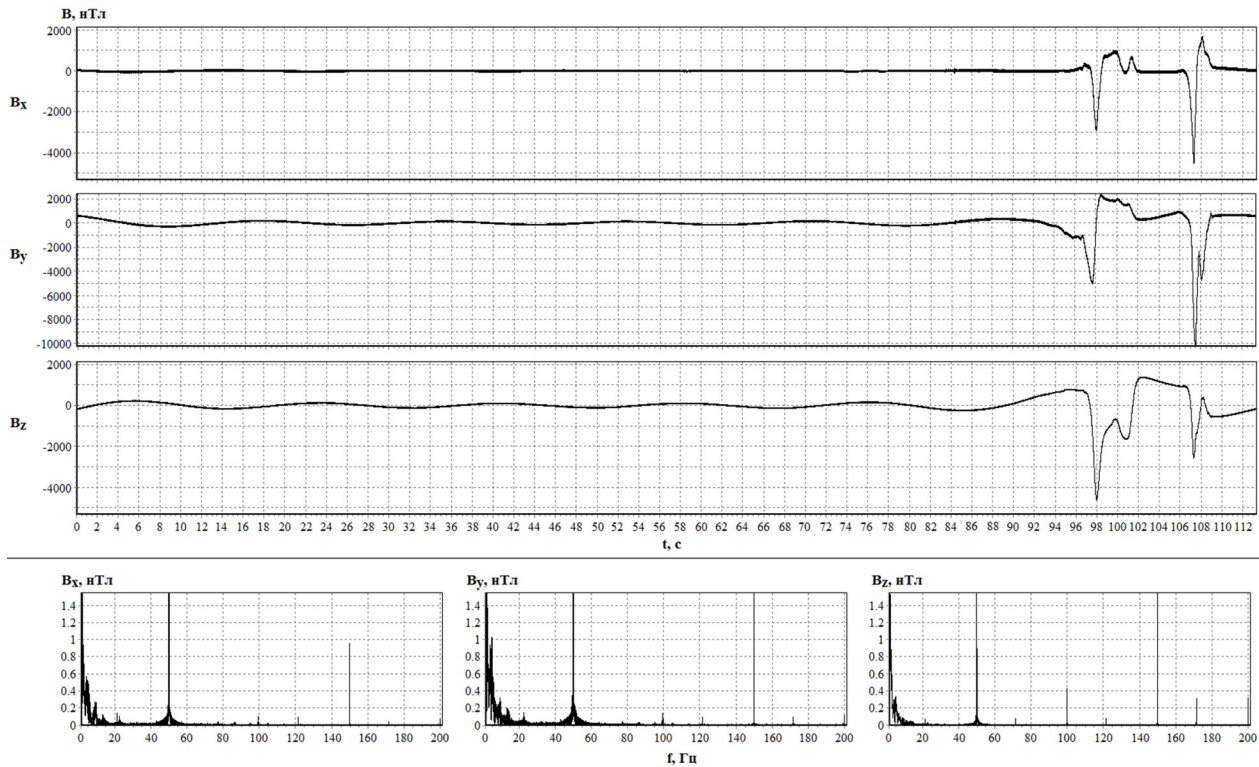


Рис. 3. Сигналы ЭМИ при трещинообразовании и разрушении первого образца горной породы.

Fig. 3. EM emission signals during cracking and destruction of the first rock sample.

Таблица 1. Значения амплитуд ЭМИ трех импульсов, проявившиеся на записи (рис. 3).

Table 1. The values of EM emission amplitudes of the three pulses manifested in the recording (Fig. 3).

Компоненты магнитной индукции	Первый импульс, нТл	Второй импульс, нТл	Третий импульс, нТл
B_x	4000	1000	6500
B_y	7000	500	11000
B_z	5500	1000	3500

до 1.1 МПа, продолжая стабильно держаться на этой отметке. Перед сбросом давления в ручном режиме между верхней и нижней плитами пресса повторно замерялось расстояние, которое составило величину ~24 мм, что указывает на отсутствие влияния подвижной поршневой части пресса на запись результатов измерений.

Также как и в первом эксперименте, во втором при нагружении образца в процессе развития напряженно-деформированного состояния, в образце формировались зоны возникновения и развития микротрещин. При активном их слиянии и укрупнении, приводящем к проявлению в индикаторах процесса трещинообразования, были слышны акустические щелчки, сопутствующие появлению на записи магнитограмм четырех импульсов ЭМИ на 93, 144, 155 и 176 с. (рис. 4).

Следует заметить, что во втором эксперименте не было необходимости полного разрушения образца с откалыванием его фрагментов, поскольку целью было проследить проявления

ЭМИ при медленном увеличении нагрузки, не достигая критической.

Проявившиеся на записи первый и третий импульсы, имеют одинаковые значения амплитуды, второй и четвертый незначительно отличаются друг от друга (табл. 2). Аналогичные отличия характерны и для формы импульсов этих компонент. Предположительно, это может быть обусловлено различием текстурных особенностей используемых в эксперименте образцов, которые проявились при их нагружении в первом и втором экспериментах.

В морфологии приведенных амплитудно-частотных спектров можно заметить одну характерную особенность. На рис. 4 смещение амплитуды от частоты ~20 Гц в низкочастотную область происходит равномерно, а ее возрастание более монотонно по сравнению с амплитудными изменениями на рис. 3. Возможно, это связано с тем, что при медленном нагружении образца в нем происходит релаксация напряжений и не образуется критического состояния,

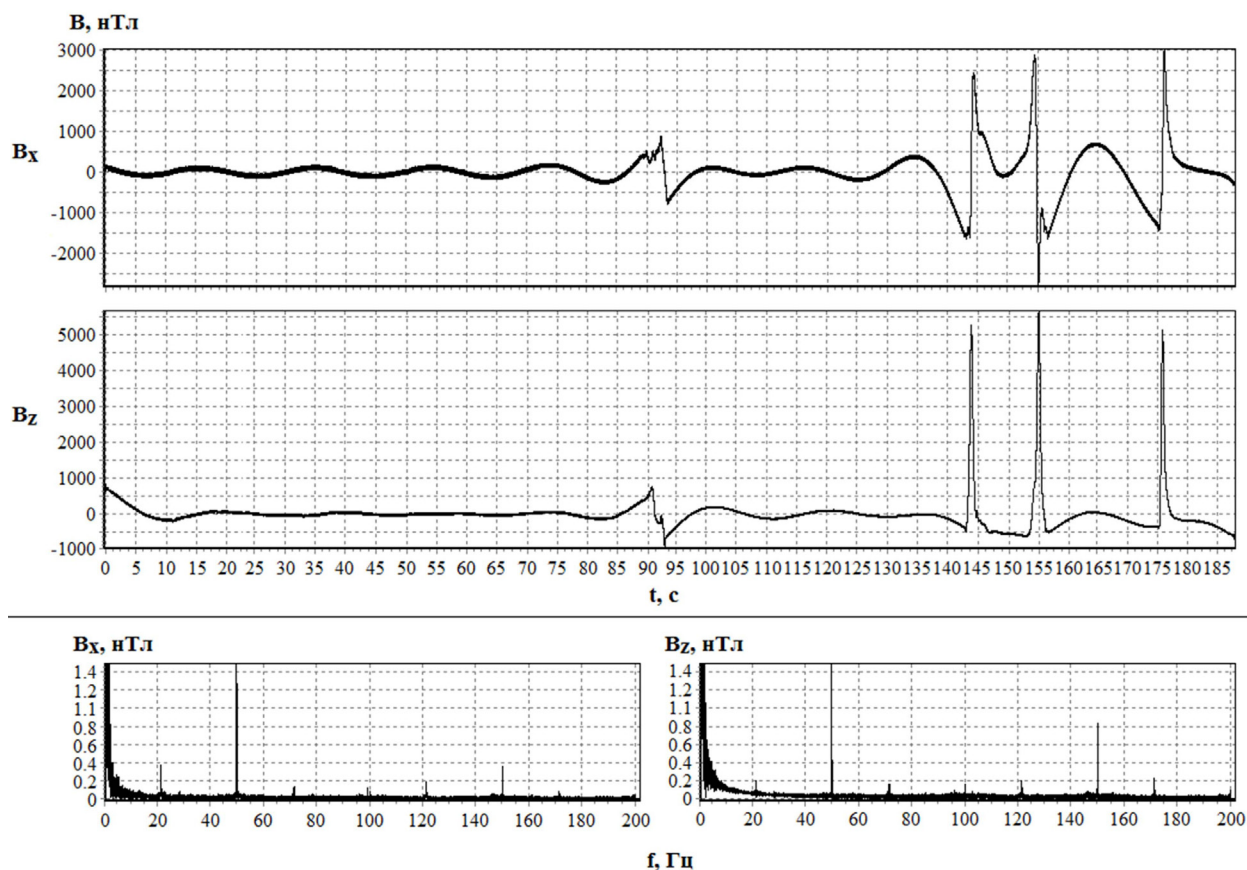


Рис. 4. Сигналы ЭМИ при трещинообразовании второго образца горной породы.

Fig. 4. EM emission signals during crack formation of the second rock sample.

Таблица 2. Значения амплитуд ЭМИ четырех импульсов (рис. 4).

Table 2. The values of EM emission amplitudes of four pulses (Fig. 4).

Компоненты магнитной индукции	Первый импульс, нТл	Второй импульс, нТл	Третий импульс, нТл	Четвертый импульс, нТл
V_x	1750	4000	6000	4500
V_z	1750	5500	6000	5500

при котором приложенное давление (внешняя нагрузка) еще не приводит к достижению предела прочности, в отличие от предыдущего эксперимента, когда концентрация напряжений в окрестности зерен минеральных включений образца при быстром увеличении внешней нагрузки приводит к его визуально видимому разрушению.

Кроме этого, может накладываться эффект релаксации зарядов, возникающих в дислокациях сплошности образца, описанный в работе (Nadjicotis, Mavromatou, 1994), приводящий к ультранизкочастотному (от 1 до 15 Гц) излучению как в электрическом, так и магнитном полях. Проявление этого эффекта наблюдается в характеристиках амплитудно-частотного спектра регистрируемого сигнала, когда преобладают флуктуации спектральной плотности в большем диапазоне низких частот (рис. 3).

Анализ магнитограмм и спектральных характеристик сигналов ЭМИ, зарегистрированных в процессе проведения экспериментов позволяет выявить ряд особенностей. При выбранных быстром и медленном режимах изменения нагрузки различна степень развития процесса разрушения образца. При быстром увеличении нагрузки образца в нем усиливается интенсивное накопление микротрещин, их слияние и укрупнение с последующим образованием магистральной трещины, в результате прорастания которой происходит потеря сплошности и разрушение образца с откалыванием от него отдельных фрагментов. При медленном нагружении образца вышеописанный процесс растянут во времени и релаксация напряжений в какой-то степени компенсирует развитие слияния и укрупнения трещин, вследствие которых он разрушается.

Сравнивая значения амплитуд импульсов ЭМИ, записи сигналов компонент магнитной индукции, представленные в (табл. 1, 2), следует, что они превысили значения амплитуд фона (рис. 1) на два порядка. Согласно работам (Мешков и др., 2022; Соболев и др., 1982) в зонах разрушения и разуплотнения горных пород амплитудные значения высокоэнергетических сигналов могут превышать уровень фона в десятки-сотни раз, что подтверждается проведенными экспериментами.

Результаты наблюдений за вариациями сигналов магнитной индукции, измеренные с использованием магнитомодуляционных датчиков в рамках двух экспериментов, по нашему мнению, показывают принципиальную возможность регистрации низкочастотного ЭМИ в процессе нагружения образцов горных пород в лабораторных условиях.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследования по изучению сигналов ЭМИ в качестве индикаторов процесса разрушения горных пород в естественных условиях залегания проводятся как в России, так и за рубежом (Бизяев, Яковицкая, 2015; Кулаков и др., 2016; Мешков и др., 2022 и др.). Отдельно заслуживают внимание исследования, проводимые в Китайской Народной Республике по отслеживанию интенсивных сигналов ультранизких (УНЧ) ЭМИ в забое угольных шахт, обусловленных деформированием и разрушением горных пород, и успешно регистрируемых на фоне промышленных помех (Wang et al., 2005, 2014). Авторами цитируемых работ установлено, что интенсивность сигнала ЭМИ может отражать степень концентрации напряжений угольного массива, а своевременно зарегистрированный сигнал хорошо соответствует изменениям напряжений в угольном забое.

Кроме того, прогнозирование динамических катастроф массивов угля или горных пород с помощью метода ЭМИ имеет преимущества бесконтактного и регионального прогноза, поскольку он не требует буровых работ, мало влияет на производство, и почти не подвержен влиянию неравномерного распределения угля или породы в пространстве или нестабильности во времени. Отмечается, что сигналы УНЧ ЭМИ отражают изменения во внутренней структуре горной породы и обладают такими характеристиками, как большая дальность распространения и меньшее затухание, поэтому диапазон УНЧ сигнала имеет большое значение в прогнозировании и предсказании динамических катастрофических явлений в шахте.

Проведенные нами эксперименты показали, что применяемая аппаратура, предназначенная для регистрации индукции слабого магнитного поля низких частот с использованием магнитомодуляционных преобразователей сигналов, позволяет регистрировать магнитные сигналы ЭМИ в диапазоне частот 0.01–200 Гц, генерируемого образцами горных пород в процессе их разрушения.

Обнаружены различия в информативных сигналах ЭМИ (превышающих фоновые шумовые значения на два порядка) при быстром и медленном одноосном нагружении образцов базальта, отражающих особенности развития процессов их разрушения.

При анализе спектрограмм установлено, что при разрушении используемых в эксперименте образцов горной породы, в амплитудно-частотном спектре магнитных составляющих поля отчетливо выявляется вклад низкочастотных гармоник, который преимущественно сконцентрирован в области частот ниже 15 Гц.

Проведенные в настоящей работе исследования показывают целесообразность и перспективность экспериментов с использованием магнитомодуляционных датчиков при изучении разрушения образцов горных пород по их индикаторам, проявляющихся в сигналах низкочастотного ЭМИ, отражающих критическое изменение напряженно-деформированного состояния в процессе их нагружения. Это может позволить получить дополнительную информацию при изучении процессов в геологической среде, порождающих низкочастотное ЭМИ в районах расположения горных выработок, особенно важную для контроля и прогноза процесса трещинообразования перед горными ударами.

Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при разработке методов прогнозирования землетрясений, где важное место отводится лабораторным экспериментам, в которых моделируются на образцах горных пород процессы подготовки землетрясений. Согласно работе В.Ф. Лось с соавторами (2010) нагружение образца, завершающееся его частичным или полным разрушением, является аналогом землетрясения в природных условиях и вызывает изменения различных свойств материала образца. Мониторинговые исследования и последующая математическая обработка полученных данных, могут дать возможность поиска закономерностей изменения физических полей, которые можно использовать в качестве предвестников разрушения образцов горных пород и далее по аналогии попытаться отыскать подобные предвестники землетрясений в природных условиях.

Список литературы [References]

- Беспалько А.А., Федотов П.И., Яворович Л.В.* Регистратор электромагнитных и акустических сигналов для контроля прочности и разрушения материалов и массивов горных пород // Известия ТПУ. 2008. Т. 312. № 2: Математика и механика. Физика. С. 255–258 [*Bespalko A.A., Fedotov P.I., Yavorovich L.V.* Recorder of electromagnetic and acoustic signals for strength and fracture control of materials and rock masses // *Izvestiya TPU*. 2008. V. 312. № 2: Mathematics and Mechanics. Physics. P. 255–258 (in Russian)].
- Беспалько А.А., Хорсов Н.Н., Федотов П.И., Кураков С.А.* Регистратор электромагнитных и акустических сигналов: Полезная модель № 80557 U1, дата регистрации 10.02.2009 [*Bespalko A.A., Khorsov N.N., Fedotov P.I., Kurakov S.A.* Recorder of electromagnetic and acoustic signals: Utility model № 80557 U1, registration date 02.10.2009 (in Russian)].
- Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е.* О контроле динамических проявлений горного давления с использованием усовершенствованной аппаратуры регистрации сигналов ЭМИ // ФТПРПИ. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 5. С. 115–123 [*Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E.* On the control of dynamic manifestations of mountain pressure using advanced equipment for recording EM emission // *FTPRPI. Physical and technical problems of mining*. 2015. № 5. P. 115–123 (in Russian)].
- Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. и др.* Регистрация электромагнитного излучения при трещинообразовании горных пород с помощью цифровой автоматизированной системы измерений // Прикладная механика и техническая физика. 1997. Т. 38. № 1. С. 167–169 [*Vostretsov A.G., Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E. et al.* Registration of electromagnetic radiation during rock fracturing using a digital automated measurement system // *Applied Mechanics and technical Physics*. 1997. V. 38. № 1. P. 167–169 (in Russian)].
- Вострецов А.Г., Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е.* Экспериментальные исследования по синхронной регистрации механических и электромагнитных параметров сигналов ЭМИ при нагружении образцов горных пород // Доклады АН ВШ РФ. 2018. № 3(40). С. 38–46 [*Vostretsov A.G., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E.* Experimental studies on synchronous registration of mechanical and electromagnetic parameters of EMR signals during loading of rock samples // *Reports of the Higher School of Economics of the Russian Federation*. 2018. № 3(40). P. 38–46 (in Russian)].
- Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А.* Петрофизика (Физика горных пород). 2-ое изд., перераб. и доп. М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2004. 368 с. [*Dobrynin V.M., Vendelstein B.Yu., Kozhevnikov D.A.* Petrophysics (Physics of rocks). 2nd ed., reprint and additional. M.: FSUE Publishing House «Oil and Gas» Gubkin RSU of Oil and Gas. 2004. 368 p. (in Russian)].
- Кривецкий А.В., Бизяев А.А.* Создание средств для лабораторных и натуральных исследований электромагнитных и деформационных процессов в горных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 6. С. 350–354 [*Krivetsky A.V., Bizyaev A.A.* Creation of tools for laboratory and field studies of electromagnetic and deformation processes in rocks // *Mining information and Analytical Bulletin*. 2010. № 6. P. 350–354 (in Russian)].
- Кулаков Г.И., Бритков Н.А.* Способ, устройство и датчик для регистрации электромагнитного излучения деформируемых твердых тел, например образцов горных пород: Патент № 2172005 С1, дата регистрации 10.08.2001 [*Kulakov G.I., Britkov N.A.* Method, device and sensor for recording electromagnetic radiation of deformable solids, for example rock samples: Patent № 2172005 С1, registration date 08.10.2001 (in Russian)].
- Кулаков Г.И., Марков В.А., Яковицкая Г.Е.* Устройство для регистрации электромагнитного излучения, возникающего при трещинообразовании горных пород: Патент № 2085736 С1, дата регистрации 27.07.1997 [*Kulakov G.I., Markov V.A., Yakovitskaya G.E.* Device for recording electromagnetic emission arising from rock fracturing: Patent № 2085736 С1, registration date 07.27.1997 (in Russian)].
- Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е.* Особенности изменения спектра частот электромагнитного излучения при разрушении образцов горных пород // Прикладная механика и техническая физика. 1994. № 35(5). С. 160–165 [*Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E.* Features of changing the frequency spectrum of electromagnetic radiation during the destruction of rock samples // *Applied Mechanics and technical Physics*. 1994. № 35(5). P. 160–165 (in Russian)].
- Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е., Шаранова М.Д., Шелканова В.И.* Прогнозирование трещинообразования в деформируемых конструкционных материалах и горных породах по их электромагнитной эмиссии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. С. 163–168 [*Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E., Sharapova M.D., Shchelkanova V.I.* Prediction of crack formation in deformable structural materials and rocks by their electromagnetic emission // *Interexpo Geo-Siberia*. 2016. P. 163–168 (in Russian)].
- Курленя М.В., Яковицкая Г.Е., Кулаков Г.И.* Стадийность процесса разрушения на основе исследования электромагнитного излучения // ФТПРПИ. 1991. № 1. С. 44–49 [*Kurlenya M.V., Yakovitskaya G.E., Kulakov G.I.* The stages of the destruction process based on the study of electromagnetic emission // *FTPRPI*. 1991. № 1. P. 44–49 (in Russian)].
- Курленя М.В., Кулаков Г.И., Марков В.А., Яковицкая Г.Е.* Устройство для регистрации электромагнитного излучения, возникающего при трещинообразовании горных пород: Патент № 2006884 С1, дата регистрации 30.01.1994 [*Kurlenya M.V., Kulakov G.I., Markov V.A., Yakovitskaya G.E.* Device for recording electromagnetic emission arising from rock fracturing: Patent № 2006884 С1, registration date 30.01.1994 (in Russian)].
- Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е.* Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения. Новосибирск: Изд-во

- СО РАН. 2000. 231 с. [*Kurlenya M.V., Vostretsov A.G., Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E.* Registration and processing of electromagnetic radiation signals. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS. 2000. 231 p (in Russian)].
- Лось В.Ф., Лементуева Р.А., Ирисова Е.Л.* Решение аппаратурно-методических проблем и изучение электромагнитного излучения в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 4. С. 14–24 [*Los V.F., Lementueva R.A., Irisova E.L.* The solution of hardware and methodological problems and the study of electromagnetic radiation in laboratory experiments on the destruction of rocks // Seismic instruments. 2010. V. 46. № 4. P. 14–24 (in Russian)].
- Мащенко А.В., Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н.* Специальные разделы механики грунтов и механики скальных пород. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. 2014. 176 с. [*Mashchenko A.V., Ponomarev A.B., Sychkina E.N.* Special sections of soil mechanics and rock mechanics. Perm: Publishing house of Perm National Research Polytechnic University. 2014. 176 p. (in Russian)].
- Мешков А.А., Ледяев Н.В., Хамутский А.А. и др.* Совершенствование способа регистрации электромагнитного излучения при нарушении сплошности горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6(2). С. 135–148 [*Meshkov A.A., Ledyayev N.V., Khamutsky A.A. et al.* Improvement of the method of registration of electromagnetic radiation in violation of the continuity of rocks // Mining information and analytical bulletin. 2022. № 6(2). P. 135–148 (in Russian)].
- Морс Ф., Фешбах Г.* Методы теоретической физики / Пер. с англ. М.: Изд-во иностранной литературы. 1958. Т. 1. 930 с. [*Morse F., Feshbach G.* Methods of theoretical physics / Translated from english. Moscow: Publishing house of foreign literature. 1958. V. 1. 930 p. (in Russian)].
- Мулев С.Н., Старников В.Н., Романевич О.А.* Современный этап развития геофизического метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) // Уголь. 2019. № 10(1123). С. 6–14 [*Mulev S.N., Starnikov V.N., Romanevich O.A.* The modern stage of development of the geophysical method of registration of natural electromagnetic radiation (EMI) // Ugol. 2019. № 10(1123). P. 6–14 (in Russian)].
- Поляшов А.С.* Природа электромагнитных излучений горными породами // Геотехническая механика: межведомственный сборник научных трудов / Академия наук Украины. Институт геотехнической механики. 2010. С. 77–80 [*Polyashov A.S.* The nature of electromagnetic radiation by rocks // Geotechnical mechanics: interdepartmental collection of scientific papers / Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Geotechnical Mechanics. 2010. P. 77–80 (in Russian)].
- Потокин А.С., Пак А.К.* Исследования акустической и электромагнитной эмиссий при одноосном сжатии образцов скальных горных пород // Наукосфера. 2020. № 11(2). С. 86–91 [*Potokin A.S., Pak A.K.* Studies of acoustic and electromagnetic emissions during uniaxial compression of rock samples // Naukosphere. 2020. № 11(2). P. 86–91 (in Russian)].
- Соболев Г.А., Демин В.М., Лось В.Ф., Майбук Ю.Я.* Исследование электромагнитного излучения пород содержащих минералы полупроводники и пьезоэлектрики // Физика Земли. 1982. № 11. С. 72–85 [*Sobolev G.A., Demin V.M., Los V.F., Maybuk Yu.Ya.* Investigation of electromagnetic radiation of rocks containing minerals semiconductors and piezoelectrics // Physics of the Earth. 1982. № 11. P. 72–85 (in Russian)].
- Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С.* Аппаратура для регистрации магнитного поля низких частот // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4(13). С. 69–73 [*Sokol-Kutylovsky O.L., Tyagunov D.S.* Equipment for registration of the magnetic field of low frequencies // Ural Geophysical Bulletin. 2007. № 4(13). P. 69–73 (in Russian)].
- Сокол-Кутыловский О.Л.* О пороге чувствительности магнитомодуляционных датчиков // Уральский геофизический вестник. 2010. № 2(17). С. 62–65 [*Sokol-Kutylovsky O.L.* On the threshold of sensitivity of magnetomodulation sensors // Ural Geophysical Bulletin. 2010. № 2(17). P. 62–65 (in Russian)].
- Сурков В.В.* Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ, 2000. – 447 с. [*Surkov V.V.* Electromagnetic effects in earthquakes and explosions. Moscow: MPhI, 2000. 447 p. (in Russian)].
- Тимоненков Ю.А., Яковицкая Г.Е.* Устройство для регистрации электромагнитного излучения, возникающего при трещинообразовании горных пород: Патент № 2155973 С1, дата регистрации 10.09.2000. [*Timonenkov Yu.A., Yakovitskaya G.E.* Device for recording electromagnetic emission arising from rock fracturing: Patent № 2155973 C1, registration date 09.10.2000 (in Russian)].
- Hadjicontis V., Mavromatou C.* Transient electric signals prior to rock failure under uniaxial compression // Geophysical Research Letters. 1994. V. 21. № 16. P. 1687–1690.
- Ogawa T., Oike K., Miura T.* Electromagnetic radiations from rocks // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 6245–6249.
- Sokol-Kutylovskii O.L.* Magnetomodulation sensors based on amorphous ferromagnetic alloys // Measurement Techniques. 2016. V. 59. № 2. P. 170–175. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0937-x>
- Wang En-Yuan, He Xue-Qiu, Dou Lin-Ming et al.* Characteristics of electromagnetic radiation from coal or rock during excavation and their applications // Chinese Journal of Geophysics. 2005. V. 48. № 1. P. 237–242.
- Wang Enyuan, Jia Huilin, Song Dazhao et al.* Use of ultra-low-frequency electromagnetic emission to monitor stress and failure in coal mines // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. P. 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2014.02.004>
- Yamada I., Masuda K., Mizutani H.* Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989. V. 57. № 1(2). P. 157–168.

ТЯГУНОВ, ШЕСТАКОВ

**REGISTRATION OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC EMISSION
BY A MAGNETOMODULATION SENSOR
IN LABORATORY EXPERIMENTS ON DESTRUCTION OF ROCK SAMPLES**

D.S. Tyagunov, A.F. Shestakov

Institute of Geophysics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, 620016

Received April 12, 2024; revised August 31, 2024; accepted September 25, 2024

The article presents the results of observations of variations in magnetic induction using magnetomodulation sensors, which made it possible to register the signals of electromagnetic (EM) emission in the range of 0.01–200 Hz generated by rock samples under fast and slow uniaxial loading in laboratory experiments. The description of the equipment and measurement techniques used in the experiments is given. At two modes of loading rock samples differences in EM emission signals reflecting the peculiarities of the development of their destruction processes are found. It is shown that during the destruction of rock samples, the amplitude-frequency spectrum of magnetic field components clearly reveals the contribution of low-frequency harmonics, which is mainly concentrated in the frequency range below 15 Hz. It is established that magnetomodulation sensors have sufficient sensitivity and resolution to observe and register EM emission signals in the frequency range of 0.01–200 Hz, manifested during the destruction of rock samples in the process of their loading.

Keywords: destruction of rock samples, electromagnetic radiation, magnetic induction.