

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-191-201

Методика выделения спектральных характеристик сигналов электромагнитного излучения, регистрируемых при нагружении образцов горных пород на фоне техногенного магнитного шума

А.Ф. Шестаков, Д.С. Тягунов

Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Амундсена, 100, г. Екатеринбург 620016, Россия

Поступила 21.04.2025

Принята к печати 02.07.2025

В настоящее время активно проводятся исследования по изучению электромагнитного излучения в процессе нагружения образцов горных пород, металлов, композиционных материалов, а также в зонах дезинтеграции массивов горных пород на участках горных выработок. Применяемая для этих целей измерительная аппаратура нацелена на регистрацию сигналов электромагнитного излучения преимущественно радиочастотного диапазона. Целью работы являлось обнаружение информативных ультранизкочастотных сигналов электромагнитного излучения, генерируемых образцом горной породы под воздействием внешней нагрузки в виде одноосного сжатия, создаваемого ручным гидравлическим прессом. Задачей исследования является идентификация выявленных сигналов низкочастотного электромагнитного излучения на фоне техногенного магнитного шума, генерируемых образцом магматической горной породы в процессе его разрушения и установление их характерных спектральных особенностей. Представлены результаты наблюдений за вариациями магнитного поля с использованием магнитомодуляционных преобразователей магнитной индукции, позволяющих осуществить регистрацию и выделение информативных сигналов, генерируемых образцом горной породы под воздействием внешней нагрузки в лабораторном эксперименте. Применяемые магнитомодуляционные преобразователи имеют достаточную чувствительность и разрешающую способность для регистрации сигналов электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,01–200 Гц, наблюдаемых при разрушении образцов горных пород в процессе их нагружения на фоне магнитного шума техногенного происхождения. Приведено описание методики измерений, оборудования и магнитометрической аппаратуры, а также этапов программной обработки исходных данных. Рассмотрена методика идентификации информативного ультранизкочастотного сигнала записи компонент магнитной индукции, генерируемого образцом магматической горной породы при его нагружении одноосным сжатием, на фоне магнитного шума техногенного происхождения. При разрушении испытуемого образца в процессе его нагружения установлено, что максимальная амплитуда сигналов электромагнитного излучения проявляется в ультранизкочастотной части спектра в диапазоне 0,3–4,0 Гц. Полученные результаты важны для изучения процессов в геологической среде, порождающих низкочастотное электромагнитное излучение, а также для исследования возможных механизмов его генерации.

Ключевые слова: магнитомодуляционный преобразователь, разрушение образцов горных пород, электромагнитное излучение, магнитная индукция, техногенный магнитный шум

Адрес для переписки:

Тягунов Д.С.
Институт геофизики Уральского отделения РАН,
ул. Амундсена, 100, г. Екатеринбург 620016, Россия
e-mail: tds-07@mail.ru

Address for correspondence:

Tyagunov D.S.
Institute of Geophysics, Ural Branch of the RAS,
Amundsen str., 100, Ekaterinburg 620016, Russia
e-mail: tds-07@mail.ru

Для цитирования:

А.Ф. Шестаков, Д.С. Тягунов.
Методика выделения спектральных характеристик сигналов электромагнитного излучения, регистрируемых при нагружении образцов горных пород на фоне техногенного магнитного шума. Приборы и методы измерений. 2025. Т. 16. № 3. С. 191–201.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-191-201

For citation:

Shestakov AF, Tyagunov DS.
A Method for Extracting the Spectral Characteristics of Electromagnetic Emission Signals Recorded during the Loading of Rock Samples on the Technogenic Magnetic Noise Background. *Devices and Methods of Measurements*. 2025;16(3):191–201. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-191-201

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-191-201

A Method for Extracting the Spectral Characteristics of Electromagnetic Emission Signals Recorded during the Loading of Rock Samples on the Technogenic Magnetic Noise Background

A.F. Shestakov, D.S. Tyagunov

*Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Amundsen str., 100, Ekaterinburg 620016, Russia*

Received 21.04.2025

Accepted for publication 02.07.2025

Abstract

Nowadays, actively conducted research to study electromagnetic emission in the process of rocks, metals, composite materials' samples loading as well as such emission in zones of rock massifs' disintegration in sections of mine works are in progress. Measuring technique used for these purposes is aimed for recording electromagnetic emission signals mainly in the radio frequency range. The paper's aim is to detect informative ultra-low-frequency electromagnetic radiation signals generated by a rock sample under the influence of an external load in the form of uniaxial compression created by a manual hydraulic press. The task of the study is to identify the detected low-frequency electromagnetic emission signals at the background of technogenic magnetic noise generated by a magmatic rock sample during its destruction and to establish their characteristic spectral features. The article presents results of observations of magnetic field variations using magnetic induction magnetomodulation transducers which allow recording and isolating informative signals generated by a rock sample under the influence of an external load in a laboratory experiment. The applied magnetomodulation transducers have sufficient sensitivity and resolution to record electromagnetic emission signals in the frequency range of 0.01–200 Hz, observed during the destruction of rock samples in process of their loading on the technogenic magnetic noise background. The paper describes the measurement technique, equipment and magnetometric apparatus, as well as the stages of software processing of initial data. The paper considers technique for identifying the informative ultra-low-frequency signal of recording the magnetic induction components generated by a sample of magmatic rock at its loading by uniaxial compression loading on the technogenic magnetic noise background. It was established that in case of destruction of the test sample during its loading the maximum amplitude of electromagnetic emission signals appeared in the ultra-low frequency part of the spectrum in the range of 0.3–4 Hz. Results obtained are important for studying the processes in the geological environment that generate low-frequency electromagnetic emission, as well as for investigating possible mechanisms of their generation.

Keywords: magnetomodulating transducer, destruction of rock samples, electromagnetic emission, magnetic induction, technogenic magnetic noise

Адрес для переписки:

Тягунов Д.С.
Институт геофизики Уральского отделения РАН,
ул. Амундсена, 100, г. Екатеринбург 620016, Россия
e-mail: tds-07@mail.ru

Address for correspondence:

Tyagunov D.S.
Institute of Geophysics, Ural Branch of the RAS,
Amundsen str., 100, Ekaterinburg 620016, Russia
e-mail: tds-07@mail.ru

Для цитирования:

А.Ф. Шестаков, Д.С. Тягунов.
Методика выделения спектральных характеристик сигналов электромагнитного излучения, регистрируемых при нагружении образцов горных пород на фоне техногенного магнитного шума. Приборы и методы измерений. 2025. Т. 16. № 3. С. 191–201.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-191-201

For citation:

Shestakov AF, Tyagunov DS.
A Method for Extracting the Spectral Characteristics of Electromagnetic Emission Signals Recorded during the Loading of Rock Samples on the Technogenic Magnetic Noise Background. *Devices and Methods of Measurements*. 2025;16(3):191–201. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-191-201

Введение

Явление электромагнитного излучения (ЭМИ), проявляющееся в процессе трещинообразования и разрушения образцов горных пород и различных материалов, наблюдается и исследуется уже более четырёх десятилетий. Наибольшее количество публикаций по этой теме посвящено возникновению в радиочастотном диапазоне импульсного ЭМИ, генерируемого трещинами, образующимися в процессе внешней нагрузки образцов, приводящей к их разрушению [1, 2].

В последнее время в литературе широко освещаются вопросы регистрации ЭМИ с использованием различных измерительных систем и устройств в процессе изменения напряжённо-деформированного состояния горных пород, приводящего к процессам их дезинтеграции и трещинообразования [1, 3, 4]. Возникающее при этом ЭМИ является одним из индикаторов процесса разрушения и может быть использовано для выработки прогностических критериев при контроле горных ударов при техногенном разрушении массива горных пород, а также для прогноза других геодинамических процессов в земной коре [5, 6].

Одним из основных аспектов изучения ЭМИ является лабораторный эксперимент, в котором на образцах горных пород моделируются процессы подготовки землетрясений [6, 7]. Однако в этих исследованиях крайне редко применяются методы регистрации генерируемого при этом ЭМИ в низкочастотном диапазоне. Преимущественно, это связано с тем, что оборудование, используемое при проведении подобных экспериментов, представляет собой мощный источник электромагнитных помех [7]. Следует отметить, что, помимо низкочастотного диапазона, такие проблемы возникают и при регистрации ЭМИ в высокочастотном диапазоне при нагружении образцов горных пород, чему посвящены работы [1, 8, 9].

Первые результаты, полученные нами в этом направлении и представленные в [10, 11] показали, что использование в качестве датчиков магнитного поля магнитомодуляционных преобразователей магнитной индукции (ММПМИ) с автопараметрическим усилением сигнала позволяет надёжно регистрировать ультранизкочастотные (УНЧ) сигналы ЭМИ в диапазоне частот 0,01–200 Гц в процессе

нагружения образцов горных пород в лабораторных экспериментах. В тоже время, в работе [7] обозначена задача, связанная с тем, что при разрушении образцов горных пород наблюдаются сигналы ЭМИ, сопоставимые по величине с уровнем техногенного магнитного шума; задача решена авторами с использованием разработанного ими аппаратно-программного комплекса. Поскольку зарегистрированные в [10, 11] амплитудные значения сигналов ЭМИ на несколько порядков превысили амплитуду вариаций техногенного шума, то у авторов не было какой-либо необходимости идентифицировать их при помощи программной обработки.

Когда при проведении лабораторного эксперимента остро возникает проблема влияния техногенного шума, при котором интенсивность информативного сигнала по амплитуде соизмерима с его уровнем, её решение может быть достигнуто также с использованием программных средств обработки измеренных данных.

На основании вышеизложенного, является актуальной задача выделения и идентификации слабых ультранизкочастотных сигналов ЭМИ, возникающих в процессе разрушения горных пород, в условиях влияния техногенного магнитного шума при проведении лабораторных экспериментов.

Целью работы являлось обнаружение информативных ультранизкочастотных сигналов ЭМИ, генерируемых образцом магматической горной породы под воздействием внешней нагрузки в виде одноосного сжатия, создаваемого ручным гидравлическим прессом. Задачей исследования являлась идентификация выявленных сигналов низкочастотного ЭМИ на фоне техногенного магнитного шума, генерируемых испытываемым образцом в процессе его разрушения, и установление их характерных спектральных особенностей.

Оборудование, используемое в эксперименте

Для проведения лабораторного эксперимента по регистрации сигналов ЭМИ применен трехкомпонентный ММПМИ, выполненный на основе аморфных ферромагнитных сердечников, работающих в режиме автопараметрического усиления сигнала. Диапазон частот измеряемого сигнала 0,01–200 Гц. Порог чувствительности

в указанном диапазоне частот – не более 1 пТл при коэффициенте преобразования 178,5 мВ/нТл. Выходные сигналы каждой из компонент ММПМИ подавались на многоканальный 24 разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) AD7734 производства фирмы Analog Device (США), выход которого соединён с переносным компьютером, управляющим работой АЦП и сохраняющим данные измерений в цифровом виде в отдельный текстовый файл. Более подробно описание аппаратуры представлено в [12–14].

Нагружение образца 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. Пресс был установлен на бетонном полу, на массивном тяжёлом металлическом основании, что исключало какие-либо микроперемещения или колебания пресса в процессе эксперимента.

Записи режимов нагружения в виде отклонения стрелки шкалы манометра пресса осуществлялись на цифровую видеокамеру SONY Handycam HDR-XR160E в отдельные файлы с частотой регистрации видеосигнала 30 Гц.

Методика измерений и обработки результатов

В лабораторном эксперименте измерялась амплитуда трёх взаимно ортогональных компонент магнитной индукции: вертикальной B_z и двух горизонтальных B_x , B_y , причём одна из горизонтальных компонент B_x имела направление по магнитному меридиану. ММПМИ фиксировался на немагнитном штативе, установленном на расстоянии 45 см от образца.

Для проведения эксперимента был взят образец кубической формы (с ребром 23 мм) дайки диабазов, относящейся к магматической полнокристаллической горной породе. После фиксации образца между верхней и нижней плитами гидравлического пресса на образец непрерывно оказывали нагрузку в виде одноосного сжатия, при которой плавно увеличивалось давление от 0 до 6 МПа с интенсивностью порядка 0,06 МПа в секунду.

Видеозапись нагружения, так же как и регистрация сигналов ЭМИ, проводилась

синхронно от начала увеличения нагрузки на образец до полного его разрушения. Измерения магнитной индукции проводились в реальном масштабе времени и отображались на экране компьютера.

Программная обработка массива данных сигналов магнитной индукции заключалась в приведении количества отсчётов разрядов АЦП в соответствие измеренной амплитуде магнитной индукции при известном коэффициенте преобразования и разрядности АЦП, построении и обработке графиков измеренных сигналов магнитной индукции.

Для обработки данных видеопотока применена программа VirtualDub 1.10.4, лицензированная GNU General Public License, при помощи которой видеофайлы разбивались на кадры. С каждого кадра программой Microsoft Excel 2010 формировался в текстовый файл массив данных времени и соответствующие ему значения.

Выделение полезного сигнала из общего техногенного магнитного шума выполнялось с помощью полосового фильтра низких частот, реализованного в виде программы на языке объектно-ориентированного программирования Borland Delphi 7, использующей дискретное преобразование Фурье.

Результаты измерений и их обсуждение

На рисунке 1 представлены результаты лабораторного эксперимента регистрации сигналов ЭМИ, генерируемых испытуемым образцом горной породы при одноосном его нагружении совместно с фоном магнитного шума техногенного происхождения, полученные в экспериментальной лаборатории Института геофизики Уральского отделения РАН.

Начало нагружения образца на магнитограммах и графике нагрузки соответствует 30-й секунде, окончание – 134-й секунде (рисунки 1а и б). Перед регистрацией сигналов ЭМИ в процессе нагружения образца на магнитограммах компонент магнитной индукции и графике нагрузки предшествует 30-ти секундный интервал фоновой записи вариаций магнитного шума без нагрузки. Аналогичный по длительности интервал приведен также и после спада нагрузки в результате разрушения образца (рисунки 1а и б). Это сделано для того, чтобы оценить уровень шума во время проводимого

эксперимента (который по компоненте B_x составляет 40 нТл, B_y и B_z – 30 нТл) и показать, что его интенсивность не оказывает влияния на последующее выделение информативного магнитного сигнала, обусловленного разрушением образца.

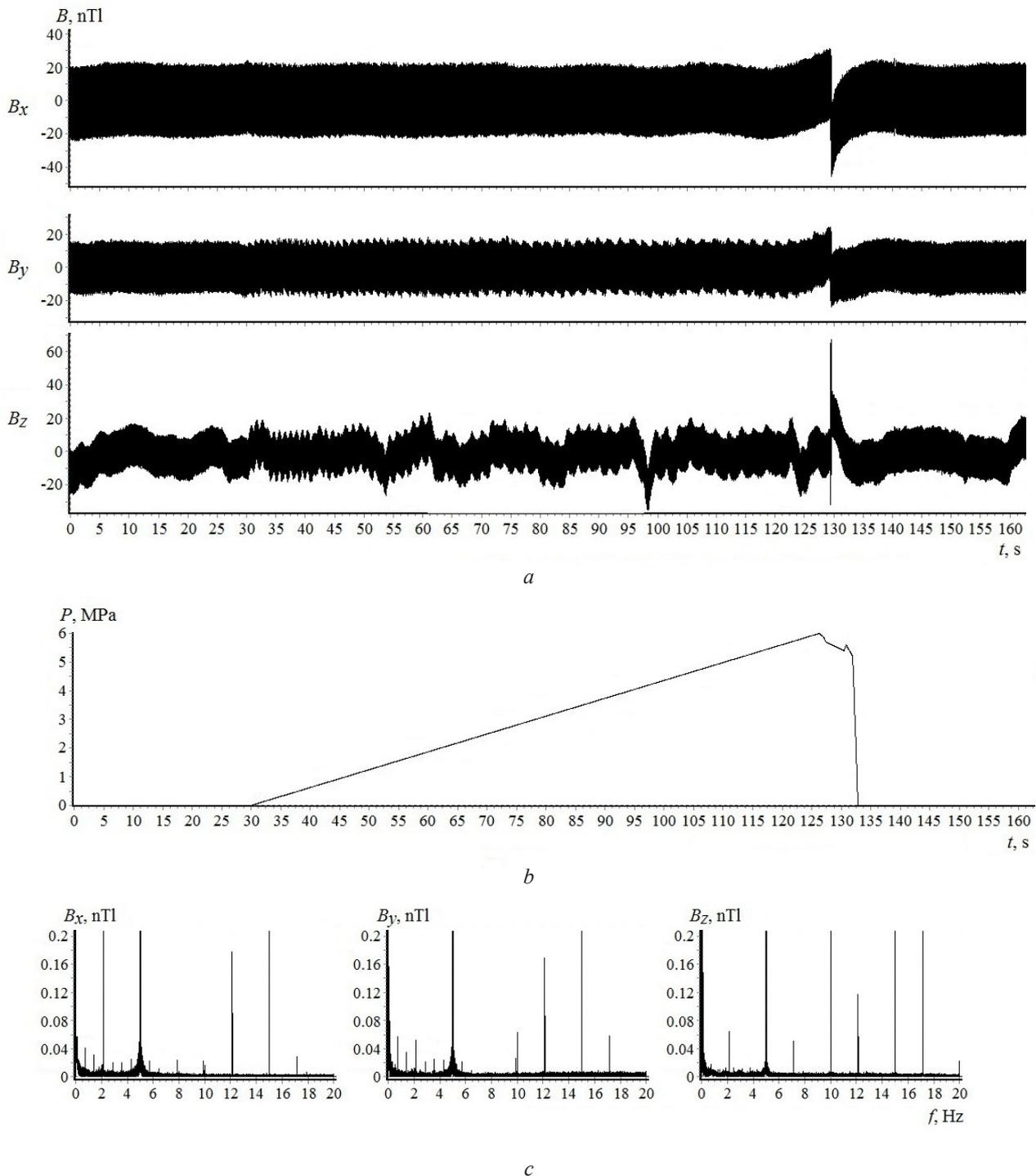


Рисунок 1 – Записи вариаций техногенного магнитного шума и ультранизкочастотных сигналов электромагнитного излучения (а), график нагрузки (б) и амплитудно-частотные спектры магнитной индукции (с): f – частота; t – время записи; P – нагрузка; B_x , B_y , B_z – измеренные значения компонент магнитной индукции

Figure 1 – Recordings of variations of technogenic magnetic noise and ultra-low frequency electromagnetic emission signals (a), graph of load (b) and amplitude-frequency spectra of magnetic induction (c): f – the frequency; t – the recording time; P – the load; B_x , B_y , B_z – the measured values of the magnetic induction components

Согласно рисунку 1а сплошной магнитный шум вызван магнитным полем рассеяния сетевой частоты 50 Гц и её гармоник, а также другими источниками переменного магнитного поля от различного оборудования, сосредоточенного в здании Института. В подтверждение этому на рисунке 1с приведены полные спектры записей магнитограмм магнитного шума.

Поскольку на амплитудные значения УНЧ сигналов ЭМИ во всей полосе пропускания (0,01–200 Гц) накладываются фоновые значения техногенного магнитного шума, то на первичных записях магнитограмм рисунка 1а сложно оценить момент начала зарождения магистральной трещины, а также форму импульса, проявившегося на 130 секунде компонент магнитной индукции. Поэтому, для подавления на исходной записи техногенного шума был проведён анализ её частотного спектра, а затем применён полосовой фильтр низких частот.

На рисунке 2 представлена запись УНЧ сигналов ЭМИ в полосе пропускания 0,01–45 Гц, в которой все частоты выше 45 Гц срезаны, а амплитудно-частотные спектры, для наглядности, развёрнуты (детализированы) до частоты 20 Гц.

Следует заметить, что значения амплитуд полезного сигнала исходной записи незначительно превосходят значения амплитуд после их обработки с применением фильтра низких частот. Вероятно, это обусловлено тем, что на информативный сигнал компонент магнитной индукции накладываются также и высоко-частотные составляющие техногенного магнитного шума, которые подавляются в результате программной обработки данных измерения.

После программной обработки исходной записи стало очевидно, что нарастание значений компонент магнитной индукции связано с увеличением на образец нагрузки до 5,5 МПа, что соответствует 120-й секунде графика нагрузки (рисунок 2b). В результате это вызвало в образце изменение его напряженно-деформированного состояния, которое привело к формированию в нём системы микротрещин, их прорастанию и слиянию. Дальнейшее увеличение нагрузки до критической (6 МПа) привело к образованию магистральных трещин на этапе предразрушения образца (127-я секунда). После пиковой нагрузки происходит её плавное падение до 5,3 МПа, что соответствует 133-й секунде (рисунок 2b), сопровождавшееся процессом текучести образца

и переходящее в раскрытие магистральных трещин. При этом давление на манометре пресса быстро снизилось с 5,3 МПа до 0 МПа в момент его полного разрушения. Следует отметить, что на этапе разрушения образца и значениях ниспадающей нагрузки 5,7; 5,4; 5,6 МПа от него исходили слышимые акустические щелчки и потрескивания.

Исходя из магнитограмм и графика нагрузки рисунка 2а и b, можно заключить, что основное разрушение образца происходит в интервале времени 127–133 с, а на 130-й секунде возникает прорастание магистральных трещин, проявившееся в виде УНЧ сигнала ЭМИ по всем компонентам магнитной индукции со значениями амплитуд: $B_x - 40$ нТл, $B_y - 30$ нТл, $B_z - 58$ нТл.

Сравнивая амплитуды сигналов ЭМИ компонент магнитной индукции (рисунок 2а), можно отметить некоторое подобие их формы, особенно по B_x и B_y . При более детальной развёртке (рисунки 3а и 4а) морфология сигналов заметно отличается. Таким образом, из этого следует, что при непрерывном нагружении образца на стадии увеличения зон прорастания и укрупнения микротрещин энергия магнитных сигналов менее значительна. При достижении критического напряженно-деформированного состояния образца происходит его лавинообразное разрушение, сопровождающееся высокоамплитудными сигналами компонент магнитной индукции.

Кроме этого, с увеличением амплитуды в спектрах на рисунке 2, соответствующих компонентам магнитной индукции в процессе нагружения образца, происходит нарастание значений низкочастотной составляющей с уменьшением частоты. Начиная с частоты 4 Гц значения амплитуд на спектрах интенсивно смещаются из высокочастотной области в низкочастотную. При этом значения их амплитуд на частоте 0,3 Гц составляют: $B_x - 0,1$ нТл, $B_y - 0,05$ нТл, $B_z - 0,2$ нТл. Если УНЧ сигнал ЭМИ выделить из всей записи и представить в высоком разрешении (11 с), то амплитуды на частоте 0,3 Гц увеличиваются до значений: $B_x - 6$ нТл, $B_y - 4$ нТл, $B_z - 7$ нТл (рисунок 3b). Представление этого сигнала в 1,1 секундном интервале показывает, что значение амплитуды на этой же частоте для $B_x - 8$ нТл, $B_y - 4,5$ нТл, $B_z - 8$ нТл (рисунок 4b). Из приведённого

сравнительного анализа следует, что суперпозиция сигналов магнитного поля близких частот (отдельные пики на участке спектров)

дают суммарную амплитуду сигнала, намного превышающую ту, что лежит строго на данной частоте.

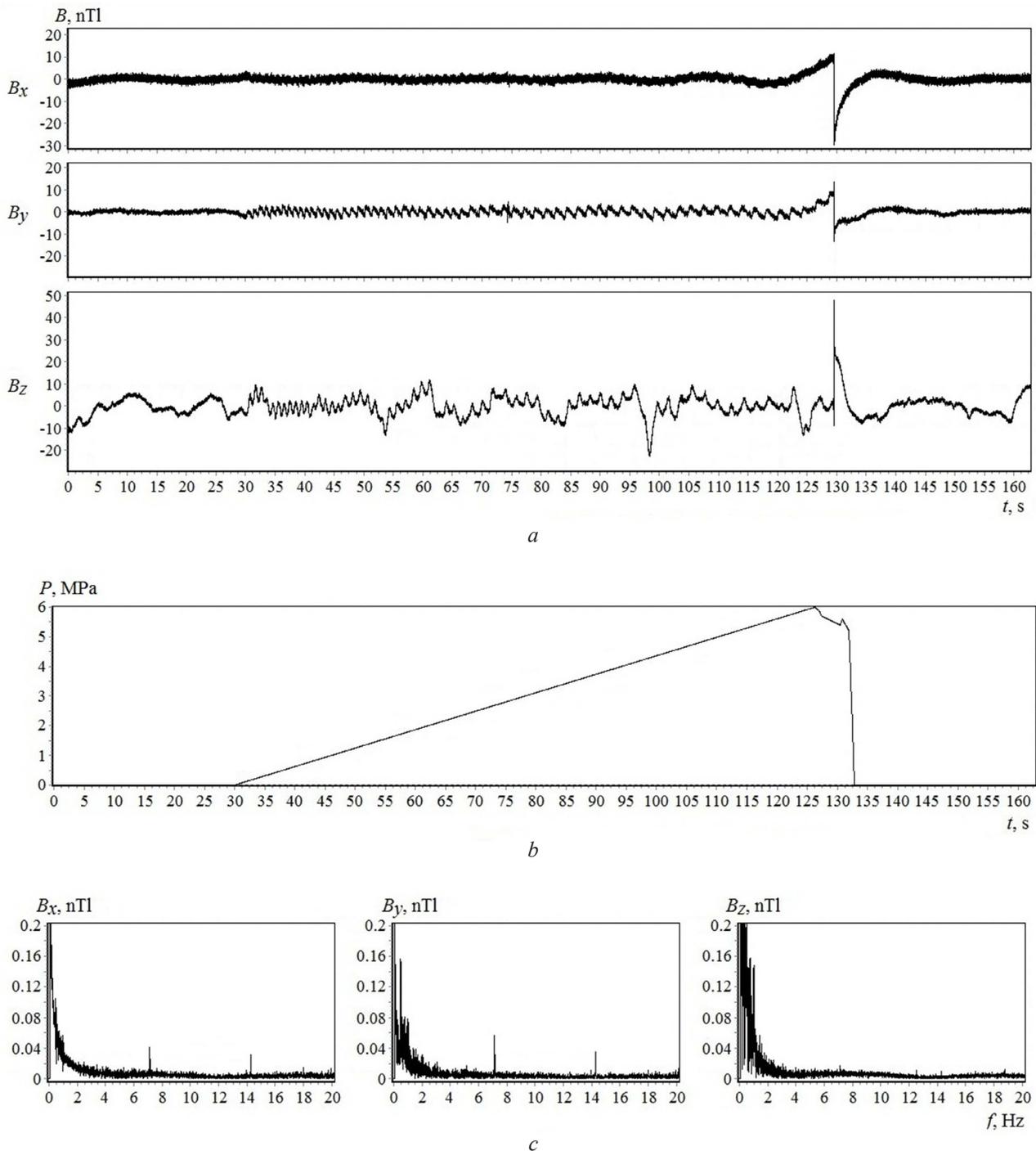


Рисунок 2 – Ультранизкочастотные сигналы электромагнитного излучения (a), график нагрузки (b) и амплитудно-частотные спектры магнитной индукции (c) после обработки: f – частота; t – время записи; P – нагрузка; B_x , B_y , B_z – измеренные значения компонент магнитной индукции

Figure 2 – Ultra-low frequency electromagnetic emission signals (a), graph of load (b) and amplitude-frequency spectra of magnetic induction (c) after processing: f – the frequency; t – the recording time; P – the load; B_x , B_y , B_z – the measured values of the magnetic induction components

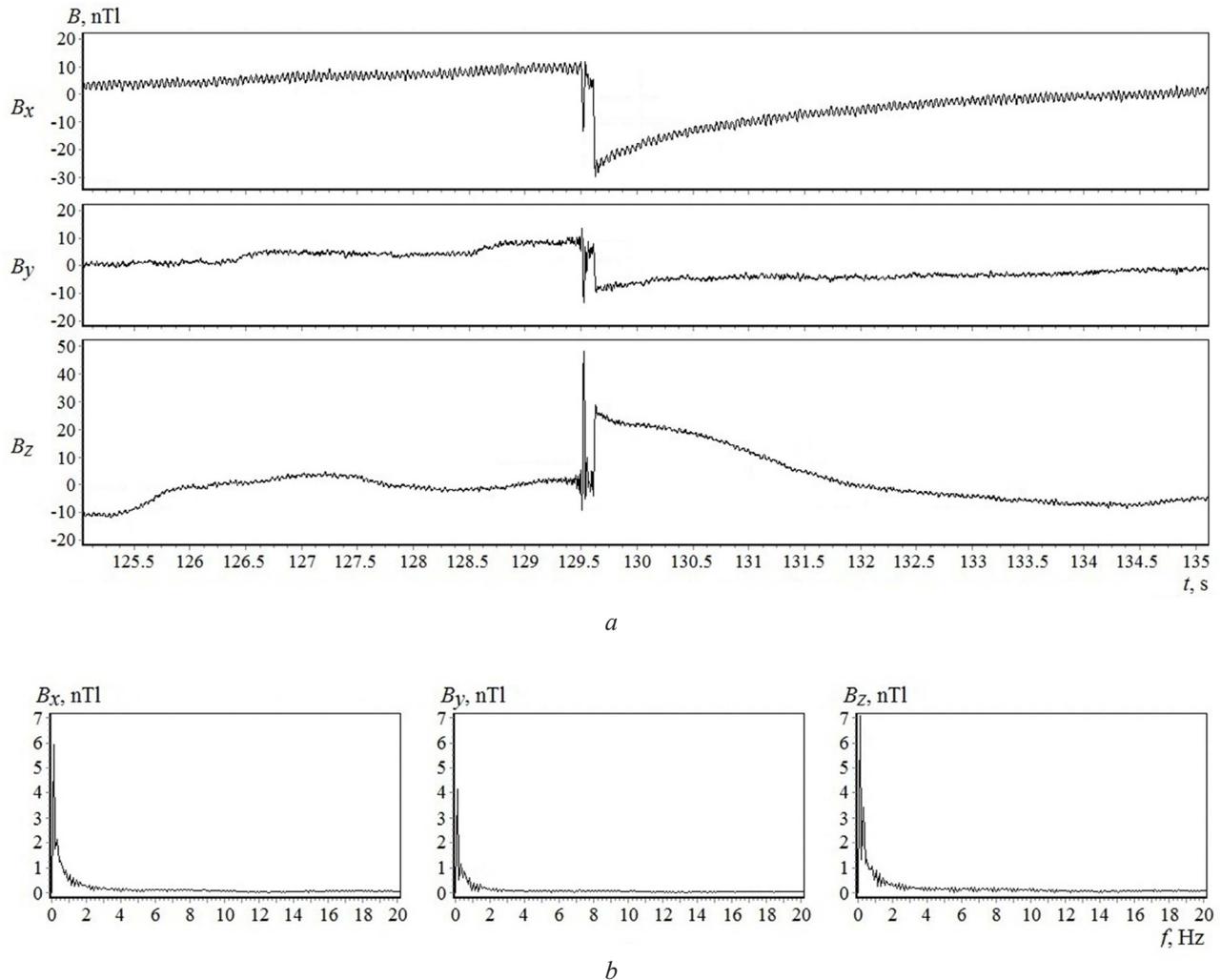


Рисунок 3 – Детализированные фрагменты ультранизкочастотных сигналов электромагнитного излучения во временном интервале 11 с, в полосе пропускания 0,01–45 Гц (а) и соответствующие им спектры, развёрнутые до 20 Гц (б): f – частота; t – время записи; P – нагрузка; B_x , B_y , B_z – измеренные значения компонент магнитной индукции

Figure 3 – Detailed fragments of ultra-low frequency electromagnetic emission signals in a time interval of 11 s, in a bandwidth of 0.01–45 Hz (a) and their corresponding spectra, unfolded up to 20 Hz (b): f – the frequency; t – the recording time; P – the load; B_x , B_y , B_z – the measured values of the magnetic induction components

Таким образом, используемый фильтр низких частот на основе быстрого преобразования Фурье для выделения малоамплитудных информативных УНЧ сигналов ЭМИ из общего магнитного шума эффективно подавляет помехи техногенного происхождения, незначительно искажая при этом исходный сигнал, и даёт возможность выявить его характерные особенности.

Полученные результаты показали, что критическая стадия разрушения горных пород может сопровождаться ЭМИ не только в радиочастотном, но также и в УНЧ диапазоне. В работах [5, 15] особое внимание акцентируется на значительном возрастании электромагнитного шума в полосе частот 0,1–5 Гц за несколько часов до начала сейсмического события, по сравнению со спокойным периодом магнитной активности.

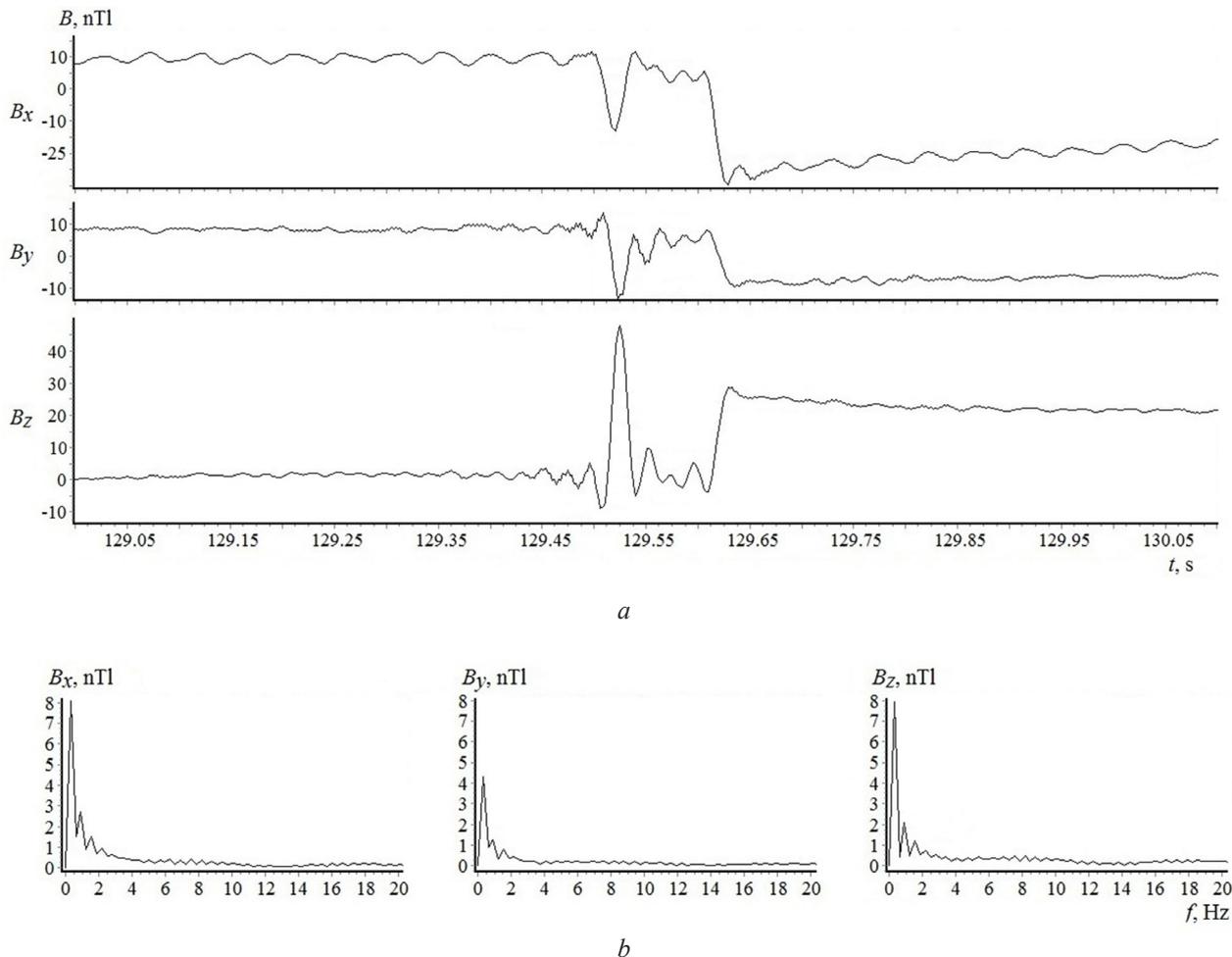


Рисунок 4 – Детализированные фрагменты ультранизкочастотных сигналов электромагнитного излучения во временном интервале 1,1 с, в полосе пропускания 0,01–45 Гц (*a*) и соответствующие им спектры, развёрнутые до 20 Гц (*b*): f – частота; t – время записи; P – нагрузка; B_x , B_y , B_z – измеренные значения компонент магнитной индукции

Figure 4 – Detailed fragments of ultra-low frequency electromagnetic emission signals in the time interval of 1.1 s, in the bandwidth of 0.01–45 Hz (*a*) and their corresponding spectra, unfolded up to 20 Hz (*b*): f – the frequency; t – the recording time; P – the load; B_x , B_y , B_z – the measured values of the magnetic induction components

В этой связи, выявление сигналов ЭМИ при увеличении этого шума может выступать в качестве одного из краткосрочных прогнозных индикаторов процесса подготовки геодинамического явления.

Заключение

Информативные магнитные ультранизкочастотные сигналы записи компонент магнитной индукции, наблюдаемые при воздействии внешней нагрузки на образцы горных пород, являются индикаторами процесса их разрушения в лабораторных экспериментах.

Применяемая аппаратура на основе магнитомодуляционных преобразователей магнитной индукции позволяет использовать её для регистрации ультранизкочастотных сигналов электромагнитного излучения и особенностей их проявления в магнитном поле вследствие различных причин природного или техногенного происхождения, связанных с разрушением горных пород.

Используемый фильтр низких частот на основе быстрого преобразования Фурье для выделения малоамплитудных информативных ультранизкочастотных сигналов электромагнитного излучения из общего магнитного

шума эффективно подавляет помехи техногенного происхождения, не искажая при этом исходный сигнал, и даёт возможность выявить его характерные особенности.

В результате программной обработки исходной записи компонент магнитной индукции установлено, что максимальная амплитуда сигналов электромагнитного излучения, наблюдаемых перед разрушением испытуемого образца, проявляется в ультранизкочастотной части спектра в интервале частот от 0,3 до 4 Гц, что позволяет считать их пригодными для выработки прогностических критериев, предваряющих геодинамические события.

Полученные результаты лабораторного эксперимента важны для исследования возможных механизмов генерации информативных магнитных сигналов при физическом моделировании разрушения образцов горных пород, а также изучения процессов в геологической среде, порождающих ультранизкочастотные сигналы электромагнитного излучения.

Список использованных источников

1. 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.

2. Соболев Г.А., Майбук З.-Ю.Я. Вызванное электромагнитное излучение горных пород, содержащих минералы-полупроводники / Г.А. Соболев, З.-Ю.Я. Майбук // Доклады АН. – 2013. – Т. 453, № 1. – С. 92–94. DOI: 10.7868/S0869565213230217

3. Опарин В.Н. Модернизированная система АСИ-2 для контроля электромагнитной эмиссии образцов горных пород при их одноосном нагружении / В.Н. Опарин [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 4. – С. 104–115.

4. Вострецов А.Г. Измерительная система синхронной регистрации сигналов ЭМИ и механических параметров деформирования образцов горных пород в лабораторных экспериментах / А.Г. Вострецов [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. – № 6. – С. 204–210. DOI: 10.15372/FTPRPI20170622

5. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ. 2000. – 447 с.

6. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники / Отв. ред. В.Н. Страхов // М.: Наука, 2003. – 270 с.

7. Лось В.Ф., Лементуева Р.А., Ирисова Е.Л. Решение аппаратно-методических проблем и изучение электромагнитного излучения в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород / В.Ф. Лось, Р.А. Лементуева, Е.Л. Ирисова // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 14–24.

8. Вострецов А.Г. Характеристики электромагнитного излучения горных пород при их разрушении в лабораторных экспериментах / А.Г. Вострецов [и др.] // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 2(21). – С. 46–54.

9. Мешков А.А. Совершенствование способа регистрации электромагнитного излучения при нарушении сплошности горных пород / А.А. Мешков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 135–148.

10. Tyagunov D.S., Shestakov A.F. Recording of ultra-low frequency electromagnetic emission during loading of a rock sample / D.S. Tyagunov, A.F. Shestakov // Measurement Techniques. – 2024. – Vol. 67, no 1. – Pp. 545–552. DOI: 10.1007/s11018-024-02375-1

11. Тягунов Д.С., Шестаков А.Ф. Регистрация магнитомодуляционным датчиком низкочастотного электромагнитного излучения в лабораторных экспериментах по разрушению образцов горных пород / Д.С. Тягунов Д.С., А.Ф. Шестаков // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2024. – № 3. – С. 18–28. DOI: 10.31431/1816-5524-2024-3-63-18-28

12. Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С. Аппаратура для регистрации магнитного поля низких частот / О.Л. Сокол-Кутыловский, Д.С. Тягунов // Уральский геофизический вестник. – 2007. – № 4. – С. 69–73.

13. Sokol-Kutylovskii O.L. Magnetomodulation sensors based on amorphous ferromagnetic alloys / O.L. Sokol-Kutylovskii // Measurement Techniques. – 2016. – Vol. 59, no 2. – Pp. 170–175. DOI: 10.1007/s11018-016-0937-x

14. Sokol-Kutylovskii O.L. A magneto-modulating meter of a weak variable magnetic field / O.L. Sokol-Kutylovskii // Instruments and Experimental Techniques. – 2019. – Vol. 62, no 4. – Pp. 554–557. DOI: 10.1134/S0020441219040110

15. Матюков В.Е. Практические результаты электромагнитно мониторинга сейсмоактивных зон (обзор) // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11, № 4. – С. 15–23.

References

1. Kurlenya MV, Vostretsov AG, Kulakov GI, Yakovitskaya GE. Registration and processing of electromag-

netic radiation signals. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS. 2000;231 p.

2. Sobolev GA, Maybuk ZYu. Induced electromagnetic radiation of rocks containing semiconductor minerals. Reports of the Academy of Sciences. 2013;453(1): 92–94. **DOI:** 10.7868/S0869565213230217

3. Oparin VN, Vostretsov AG, Krivetsky AV, Bizyaev AA, Yakovitskaya GE. The upgraded ASI-2 system for monitoring the electromagnetic emission of rock samples during their uniaxial loading. Physico-technical problems of mining. 2010;(4):104–115.

4. Vostretsov AG, Kulakov GI, Bizyaev AA, Yakovitskaya GE. Measuring system for synchronous recording of EMR signals and mechanical parameters of deformation of rock samples in laboratory experiments. Physico-technical problems of Mining. 2017;(6):204–210. **DOI:** 10.15372/FTPRPI20170622

5. Surkov VV. Electromagnetic effects in earthquakes and explosions. Moscow: MEPhI, 2000;447 p.

6. Sobolev GA, Ponomarev AV. Physics of Earthquakes and Precursors. Moscow: Nauka. 2003;270 p.

7. Los VF, Lementueva RA, Irisova EL. Solving hardware and methodological problems and studying electromagnetic radiation in laboratory experiments on rock destruction. Seismic instruments. 2010;46(4):14–24.

8. Vostretsov AG, Krivetsky AV, Bizyaev AA, Yakovitskaya GE. Characteristics of electromagnetic emissions of rocks during their destruction in laboratory experiments. Reports of the Academy of Sciences of the Russian Federation. 2013;2(21):46–54.

9. Meshkov AA, Ledyayev NV, Khamutsky AA, Savchenko AV, Bizyaev AA. Improvement of the method of registration of electromagnetic radiation in violation of the continuity of rocks. Mining information and analytical bulletin. 2022;6(2):135–148.

10. Tyagunov DS, Shestakov AF. Recording of ultra-low frequency electromagnetic emission during loading of a rock sample. Measurement Techniques. 2024;67(1):545–552.

DOI: 10.1007/s11018-024-02375-1

11. Tyagunov DS, Shestakov AF. Registration of low-frequency electromagnetic radiation by a magneto-modulatory sensor in laboratory experiments on the destruction of rock. Bulletin of KRAUNTS. Series: Earth Sciences. 2024;3(63):18–28.

DOI: 10.31431/1816-5524-2024-3-63-18-28

12. Sokol-Kutylovsky OL, Tyagunov DS. Equipment for registration of the magnetic field of low frequencies. Ural Geophysical Bulletin. 2007; 4(13): 69–73.

13. Sokol-Kutylovskii OL. Magnetomodulation sensors based on amorphous ferromagnetic alloys. Measurement Techniques. 2016;59(2):170–175.

DOI: 10.1007/s11018-016-0937-x

14. Sokol-Kutylovskii OL. A magneto-modulating meter of a weak variable magnetic field. Instruments and Experimental Techniques. 2019;62(4):554–557.

DOI: 10.1134/S0020441219040110

15. Matyukov V.E. Practical results of electromagnetic monitoring of seismoactive zones (review). Bulletin of KRSU. 2011;11(4):15–23.