

УДК 622.83; 550.343

DOI: 10.46698/VNC.2026.87.99.001

Оригинальная статья

Изучение сигналов электромагнитного излучения при разрушении образцов известняка в процессе их одноосного нагружения

А.Ф. Шестаков[✉], Д.С. Тягунов[✉]

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, e-mail: tds-07@mail.ru

Статья поступила: 31.10.2025, доработана: 10.03.2026, принята к публикации: 13.03.2026

Резюме: Актуальность работы. В настоящее время достаточно широко проводятся экспериментальные исследования электромагнитного излучения (ЭМИ), регистрируемого в процессе трещинообразования и разрушения образцов горных пород и различных материалов под воздействием внешней нагрузки. При этом, большинство публикаций по этой теме посвящено изучению сигналов электромагнитного поля высокочастотного диапазона. В лабораторных экспериментах крайне редко применяются методы регистрации ЭМИ, генерируемого в процессе нагружения образцов горных пород в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне, с целью поиска закономерностей появления информативных сигналов в электромагнитном поле, которые можно использовать в качестве индикаторов разрушения. Особенно остро эта задача возникает, когда они соизмеримы с уровнем шумов техногенного происхождения. В этой связи, физическое моделирование процессов разрушения на образцах горных пород является актуальным для изучения деструктивных процессов в геологической среде, порождающих низкочастотное ЭМИ, а также для исследования возможных механизмов его генерации. **Цель исследований** – выявить особенности проявления малоамплитудных УНЧ сигналов ЭМИ на фоне техногенного магнитного шума, регистрируемых магнитомодуляционным преобразователем магнитной индукции в процессе разрушения двух образцов горной породы, отличающихся по своим свойствам и минералогическому составу, а также рассмотреть возможные причины и факторы, влияющие на их характеристики. **Методы исследования:** лабораторный эксперимент по регистрации сигналов магнитной индукции при воздействии внешней нагрузки на образцы горной породы; программная обработка данных с применением полосового фильтра низких частот на основе дискретного преобразования Фурье; выявление и анализ информативных УНЧ сигналов ЭМИ в диапазоне 0.01–45 Гц и их сопоставление с графиком нагрузки. **Результаты.** Проведено исследование характерных особенностей сигналов ЭМИ в диапазоне 0.01–45 Гц, генерируемого образцами известняка при одноосном их нагружении, создаваемом ручным гидравлическим прессом в лабораторном эксперименте. Рассмотрена методика выявления УНЧ сигналов ЭМИ, возникающего при воздействии внешней нагрузки для двух различных образцов известняка на фоне магнитного шума техногенного происхождения, а также возможные факторы, влияющие на их характеристики, такие как прочность, состав и микроструктура образцов.

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

Для цитирования: Шестаков А.Ф., Тягунов Д.С. Изучение сигналов электромагнитного излучения при разрушении образцов известняка в процессе их одноосного нагружения. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 69–79. DOI: 10.46698/VNC.2026.87.99.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.87.99.001

Original paper

Research of electromagnetic emission signals during the destruction of limestone samples under uniaxial loading

A.F. Shestakov^{ORCID}, D.S. Tyagunov^{ORCID}

Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg 620016, 100 Amundsen Str., Russian Federation,
e-mail: tds-07@mail.ru

Received: 31.10.2025, revised: 10.03.2026, accepted: 13.03.2026

Abstract: Relevance. At present, experimental studies of electromagnetic emission (EME) recorded in the process of destruction of rock samples and various materials under the influence of external load are quite widespread. However, most publications on this topic are devoted to the study of high-frequency electromagnetic field signals. In laboratory experiments, methods of recording EME generated during loading of rock samples in the ultra-low frequency (ULF) range are extremely rarely used in order to search for regularities of the appearance of informative signals in the electromagnetic field, which can be used as indicators of destruction. This task is especially acute when these signals are comparable to technogenic noise levels. In this regard, physical modeling of destruction processes on rock samples is relevant for the study of destructive processes in the geological environment that generate low-frequency ULF, as well as for investigating the possible mechanisms of its generation. **Aim** of the study – to identify the appearing features of low-amplitude ULF EME signals against the background of technogenic magnetic noise recorded by the magnetic modulation transducer of magnetic induction in the process of destruction of two rock samples that differ in their properties and mineralogical composition, as well as to consider possible causes and factors affecting their characteristics. **Methods:** laboratory experiment to record magnetic induction signals under the influence of an external load on rock samples; software data processing using a low-pass bandpass filter based on the discrete Fourier transformation; detection and analysis of informative ULF EME signals in the range 0.01–45 Hz and their comparison with the load graph. **Results.** A study of the characteristic features of EME signals in the 0.01–45 Hz range generated by limestone samples under their uniaxial loading created by a manual hydraulic press in a laboratory experiment was carried out. A method for detecting ULF EME signals generated by external loading on two different limestone samples against a background of technogenic magnetic noise was considered, as well as possible factors affecting their characteristics, such as strength, composition, and microstructure of the samples.

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

For citation: Shestakov A.F., Tyagunov D.S. Research of electromagnetic emission signals during the destruction of limestone samples under uniaxial loading. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 69–79. DOI: 10.46698/VNC.2026.87.99.001

Введение

Известно, что к настоящему времени насчитывается около двухсот природных явлений, предваряющих или вызываемых землетрясениями, среди которых фундаментальная роль отводится изучению процессов, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород [Заалишвили и др., 2022].

Сейчас можно считать установленным, что электромагнитное излучение (ЭМИ) является одним из индикаторов деструктивных процессов, протекающих в геологи-

ческой среде и обусловленных изменением напряженно-деформированного состояния, наряду с акустической эмиссией и вариационными аномалиями, вызванными миграцией радиогенных газов, приуроченными к очагу разрушения [Курленя и др., 2000; Соболев, Пономарев, 2003; Заалишвили и др., 2022].

Для изучения особенностей поведения горных пород с позиций поиска критериев прогнозирования геодинамических явлений важную роль отводят лабораторным экспериментам, в которых моделируются эти процессы на образцах горных пород и различных композиционных материалов. При этом существенное внимание уделяется регистрации и изучению сигналов ЭМИ, генерируемого образцами при их трещинообразовании и разрушении в результате приложения к ним внешней нагрузки [Курленя и др., 2000; Соболев, Пономарев, 2003; Лось и др., 2010; Вострецов и др., 2013].

Следует отметить, что в преобладающем большинстве таких экспериментов наблюдаются и исследуются сигналы ЭМИ в высоко- и радиочастотном диапазонах, хотя низкочастотное, а особенно ультранизкочастотное (УНЧ) ЭМИ обладает тем преимуществом, что оно распространяется на большие расстояния от очага готовящегося геодинамического события вследствие меньшего поглощения в геологической среде [Сурков, 2000].

Актуальность изучения УНЧ ЭМИ, предвещающего геодинамические события, обусловлена еще и тем, что накоплен и опубликован большой материал экспериментальных данных по возрастанию ультранизкочастотных сигналов магнитной индукции, наблюдаемых от нескольких часов и дней до начала землетрясений в частотном диапазоне 0.01–40 Гц на расстояниях от десятков до сотен километров [Park et al., 1993; Сурков, 2000; Матюков, 2011; Shrivastava, 2014; и др.].

Ранее авторами были проведены лабораторные эксперименты по регистрации высокоамплитудных УНЧ сигналов ЭМИ и изучены их спектральные характеристики на примере разрушения образца базальта, способного хорошо накапливать энергию деформации под воздействием внешней нагрузки, перед тем как наступит критическая стадия его хрупкого разрушения, сопровождающаяся ЭМИ [Tyagunov, Shestakov, 2024]. В этом эксперименте используемый образец относился к скальной магматической породе, обладающей высоким пределом прочности на одноосное сжатие [Мащенко и др., 2014], вследствие чего его разрушение сопровождалось генерацией высокоамплитудных УНЧ сигналов ЭМИ, значительно превосходящих уровень флуктуаций техногенного магнитного шума в месте проведения эксперимента и их идентификация не вызвала особых затруднений. Что касается малоамплитудных сигналов, то для их выделения была предложена соответствующая методика [Шестаков, Тягунов, 2025], которая позволила выявить такие информативные сигналы и установить их характерные особенности.

Естественно, что сигналы ЭМИ для разных горных пород могут быть различны [Вострецов и др., 2013; Xiaoan et al., 2018]. С одной стороны, на них влияют внешние факторы, такие как способ нагрузки, условия эксперимента и т.д. С другой стороны, они зависят от свойств горной породы, например, физических и механических.

В данной статье исследованы характерные особенности выделения сигналов ЭМИ, по-разному проявляющихся от одного типа образцов горных пород при их одноосном нагружении с применением ручного гидравлического пресса в лабораторном эксперименте, а также рассмотрены возможные причины и факторы, связанные с этим различием (микроструктура, прочность, состав образцов).

Целью настоящей работы является изучение проявления информативных малоамплитудных УНЧ сигналов ЭМИ на фоне флуктуаций техногенного магнитного шума с применением магнитомодуляционного преобразователя для регистрации

компонент магнитной индукции в процессе разрушения двух образцов известняка, отличающихся по своим физико-механическим свойствам и минералогическому составу. Это позволит полнее верифицировать УНЧ ЭМИ как индикатора процессов разрушения в геологической среде, пригодного для выработки прогностических критериев при изучении состояния массивов горных пород в условиях естественно-го залегания и возможных механизмов его генерации, сопутствующих геодинамическим явлениям.

Методы исследования

Для регистрации сигналов ЭМИ был применен трехкомпонентный магнитомодуляционный преобразователь магнитной индукции (ММПМИ), выполненный на основе аморфных ферромагнитных сердечников с компенсированной продольной магнитострикцией и частотным диапазоном 0.01÷200 Гц [Сокол-Кутыловский, 2022]. Чувствительность ММПМИ (~1 пТл и менее) позволяет его использовать при изучении характеристик УНЧ электромагнитных сигналов и особенностей их проявления в магнитном поле вследствие различных причин природного или техногенного происхождения, связанных с разрушением горных пород.

В эксперименте измерялись амплитуды взаимно ортогональных горизонтальных компонент магнитной индукции: B_x , B_y , одна из них имела направление по магнитному меридиану. Система ММПМИ, жестко зафиксированная на немагнитном штативе, была установлена на расстоянии ~450 мм от образца.

Нагружение образцов осуществлялось при помощи ручного гидравлического одноосного пресса марки WK-18 (ZARZAD SPRZETU, Польша) с классом точности 0.5, рассчитанного на максимальную нагрузку 100 тонн. Запись режимов нагружения образцов осуществлялась на цифровую видеокамеру SONY Handycam HDR-XR160E. Более детально характеристики аппаратуры и методика проведения измерений описаны в [Сокол-Кутыловский, 2022; Tyagunov, Shestakov, 2024].

Образцы известняка кубической формы (далее «Варна 1» и «Варна 2») с ребрами 23 мм были отобраны с разреза «Варна», который относится к Тогузак-Аятской свите и проходит по правому берегу р. Нижний Тогузак, что в 2 км южнее пос. Варна Челябинской области [Свяжина и др., 2003].

Для изучения возможного влияния различных факторов на генерацию ЭМИ испытуемые образцы после их разрушения подверглись минералогическому (рентгенофазовому) анализу. Этот анализ проводился по основным рефлексам с применением методики идентификации фазового состава горных пород и минералов № 88-16360-119-01.00076-2011 с использованием дифрактометра XRD-7000 фирмы «Shimadzu» (Отчет № 10Н-2025 о выполненных аналитических работах в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН / отв. исполнитель – к.г.-м.н. М.С. Глухов).

В отличие от образца, использованного в работе [Tyagunov, Shestakov, 2024], выбор этих образцов был обусловлен тем, что осадочные породы обладают низким пределом прочности [Флоренский и др., 2003] на одноосное сжатие, а значит, накопление энергии деформации в процессе внешней нагрузки, перед тем как наступит критическая стадия его полного разрушения, может сопровождаться сигналами ЭМИ малой амплитуды. Подобные особенности были также отмечены при регистрации высокочастотного импульсного ЭМИ, генерируемого при разрушении образцов горных пород в лабораторных экспериментах [Курленя и др., 2000; Вострецов и др., 2013]. Также, в работе [Вострецов и др., 2013] отмечается, что для образцов мраморизованного известняка, принадлежащих к «пластичным» породам характерно «спокойное» развитие процесса разрушения с достаточно плавным падением нагрузки.

Результаты и обсуждение

После фиксации образцов между плитами гидравлического пресса на них непрерывно оказывали нагрузку в виде одноосного сжатия, при которой плавно увеличивалось давление до их полного разрушения. На образец «Варна 1» весом 30 г нагрузка увеличивалась от 0 МПа до 0.8 МПа, «Варна 2» весом 35 г – от 0 МПа до 2.2 МПа.

Следует отметить, что согласно работам [Лось и др., 2010; Chengwu et al., 2018] при проведении в лабораторных экспериментах регистрации УНЧ сигналов ЭМИ необходимо учитывать техногенный магнитный шум, особенно, если регистрируемый сигнал близок или сопоставим с ним по амплитуде. Поскольку значения измеряемых сигналов оказались ниже уровня магнитного шума, то для их выделения был применен полосовой фильтр низких частот (ФНЧ), реализованный в виде программы на языке Borland Delphi 7, использующей дискретное преобразование Фурье. С помощью ФНЧ все частоты выше 45 Гц были срезаны.

На рисунке 1 представлены результаты экспериментов после программной обработки. Начало нагружения образцов на магнитограммах и графике нагрузки соответствует 10-й секунде, окончание – 75-й секунде (рис. 1, а) и 85-й секунде (рис. 1, с).

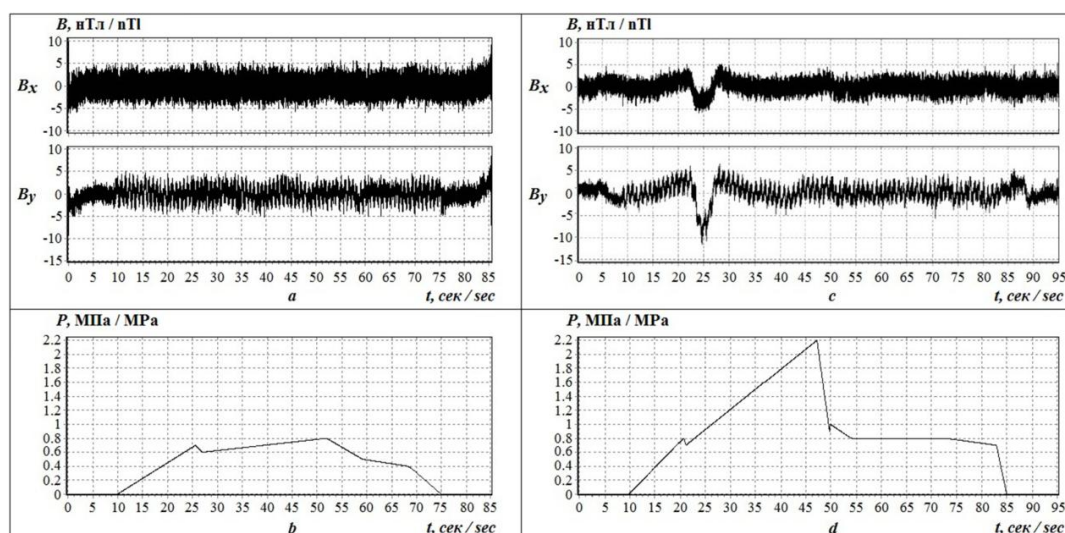


Рис. 1. Записи вариаций техногенного магнитного шума и УНЧ сигналов ЭМИ в полосе пропускания 0.01–45 Гц (а, с) и графики нагрузки (b, d) /

Fig. 1. Recordings of variations in technogenic magnetic noise and ULF signals EM emission in the 0.01–45 Hz bandwidth (a, c) and the load graphs (b, d)

Перед регистрацией сигналов ЭМИ в процессе нагружения образцов, а также после их разрушения на магнитограммах и графике нагрузки записаны соответственно (до и после) 10-ти секундные интервалы фоновой записи вариаций магнитного шума (рис. 1 а, рис 1 с) для оценки его интенсивности.

Согласно представленным результатам (рис. 1, а) при нагружении образца «Варна 1» на записях магнитограмм сигналы ЭМИ не проявились при возрастании и спаде нагрузки, пиковое значение которой составило 0.8 МПа (рис. 1, b).

При воздействии внешней нагрузки на образец «Варна 2», сигнал ЭМИ на записях магнитограмм (рис. 1, с) проявляется на начальной стадии его нагружения. После 5-й секунды интенсивность ЭМИ начинает возрастать с увеличением нагрузки. Следует отметить, что по характеру проявления амплитуда сигнала в процессе нагрузки изменяется плавно, а его длительность соответствует интервалу 20 секунд. На 21-й секунде графика нагрузки (рис. 1, d) информативный сигнал становится более

выраженным и достигает своего максимума примерно через 4 секунды, что соответствует 25-й секунде на магнитограммах (рис. 1, *c*). Вероятно, это связано с тем, что в образце происходит формирование и слияние микротрещин, что отразилось в виде незначительного скачка на графике нагрузки (рис. 1, *d*).

Далее, согласно графику (рис. 1, *d*), ее рост продолжается до 2.2 МПа, а интенсивность ЭМИ падает, что говорит о завершении процесса ее возможной генерации зарядами, возникающими на бортах образовавшихся макротрещин и их миграцией [Wang, He, 2000]. После 47-й секунды образец теряет свои прочностные свойства, и нагрузка с 2.2 МПа плавно падает до 0 МПа (рис. 1, *d*). Это может быть обусловлено перераспределением накопленной энергии деформации в поверхностную энергию, связанную с возникновением системы образовавшихся трещин в процессе воздействия внешней нагрузки на образец [Беликов, Шестаков, 2008].

Сравнивая результаты экспериментов рисунка 1 можно отметить, что структура и текстура этих образцов оказывает значительное влияние на характеристики сигналов ЭМИ. Образец «Варна 1» оказался более пластичным по своей структуре и менее способным накапливать упругую энергию деформации из-за слабых прочностных свойств. Это не способствует развитию микротрещин в объеме образца, а также образованию макротрещин, порождающих УНЧ сигналы ЭМИ. При нагружении образца «Варна 2» в нем образуются дислокации и прорастают магистральные трещины, развитие которых обуславливает генерацию ЭМИ с увеличением нагрузки (рис. 1, *c*). Сделанные выводы также подтверждаются и амплитудно-частотными спектрами рисунка 2.

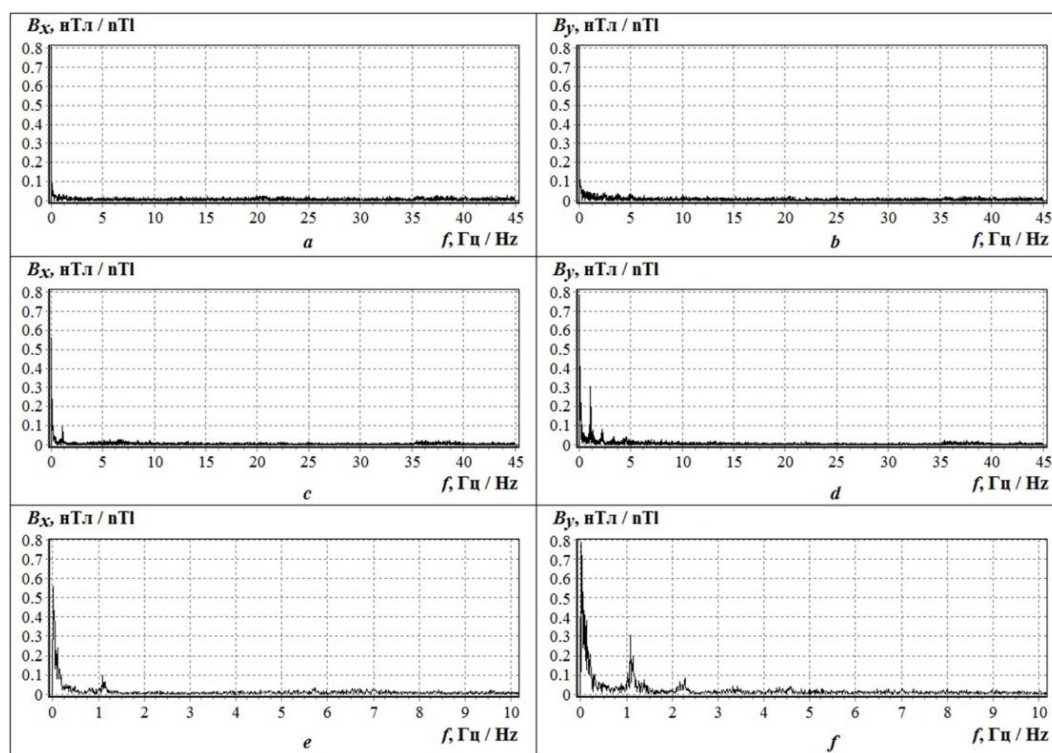


Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры магнитной индукции: *a, b* – образца «Варна 1»; *c, d* – образца «Варна 2»; *e, f* – детализированные спектры образца «Варна 2» /

Fig. 2. Amplitude-frequency spectra of magnetic induction: *a, b* – sample “Varna 1”; *c, d* – sample “Varna 2”; *e, f* – detailed spectra of sample “Varna 2”

На спектрограммах компонент магнитной индукции образца «Варна 1» (рис. 2, *a, b*) УНЧ составляющая сигналов ЭМИ не проявилась во всей полосе пропускания,

а их спектры соответствуют розовому шуму. На спектрограммах образца «Варна 2» (рис. 2, *c, d, e, f*) в области частот ниже 5 Гц происходит нарастание низкочастотной составляющей. По компоненте B_x значение амплитуды на частотах 0.01 Гц и 1.1 Гц составило 0.55 нТл и 0.1 нТл; B_y на этих же частотах 0.8 нТл и 0.3 нТл соответственно, а на частоте 2.3 Гц – 0.08 нТл. Проявившиеся на амплитудно-частотных спектрах образца «Варна 2» выраженные пики указанных выше частот непосредственно связаны с генерацией УНЧ ЭМИ при увеличении на образец внешней нагрузки.

Вместе с тем следует заметить, что в процессе разрушения испытуемых образцов вполне можно допустить возникновение высокочастотного ЭМИ, генерируемого на стадии возникновения микротрещин, которое наблюдается в подобных экспериментах [Курленя и др., 2000; Соболев, Пономарев, 2003; Лось и др., 2010; Вострецов и др., 2013; и др.]. Однако используемая в наших экспериментах аппаратура не предназначена для измерения таких сигналов в частотном диапазоне выше 200 Гц.

Поскольку в ряде работ [Курленя и др., 2000; Вострецов и др., 2013; Xiaoyan et al., 2018] показано, что при разрушении образцов разных горных пород проявляется различный характер ЭМИ, то основная причина этого может быть обусловлена различным составом, прочностными свойствами и структурой самих образцов. Чтобы оценить эти факторы был проведен минералогический анализ образцов «Варна 1» и «Варна 2».

По результатам минералогического анализа первый образец «Варна 1» – известняк. Порода сложена преимущественно зернами кальцита (95–99 % площадной доли участков шлифа) размером 0.01–0.5 мм (рис. 3, *a*). Преобладают зерна песчанистой размерности. Структура конформнозернистая, мелко-средне-крупнозернистая. Текстура однородная, прожилковая. Апертура прожилков 0.01–0.03 мм. Прожилки заполнены кальцитом, образованным при вторичных геологических процессах (рис. 3, *a*). Редко встречаются ромбоэдры зерен доломита, занимающие до 2 % площадной доли участков шлифа (рис. 3, *b*).

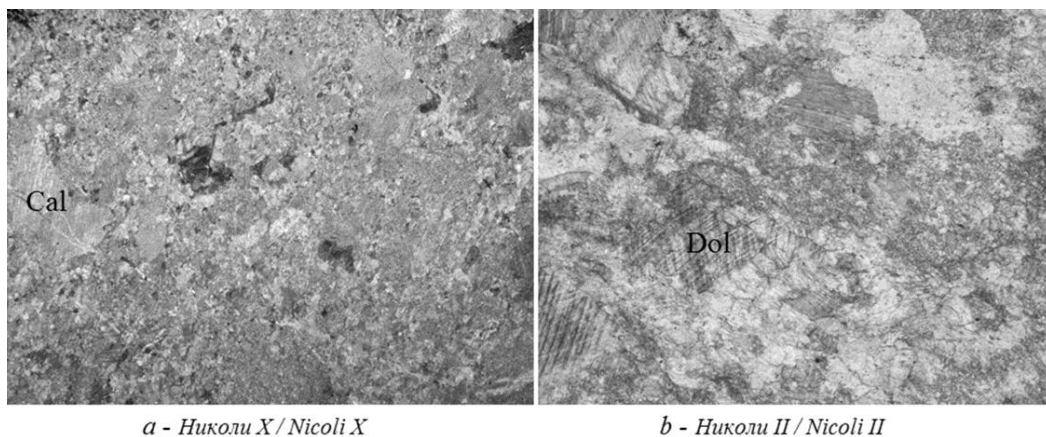
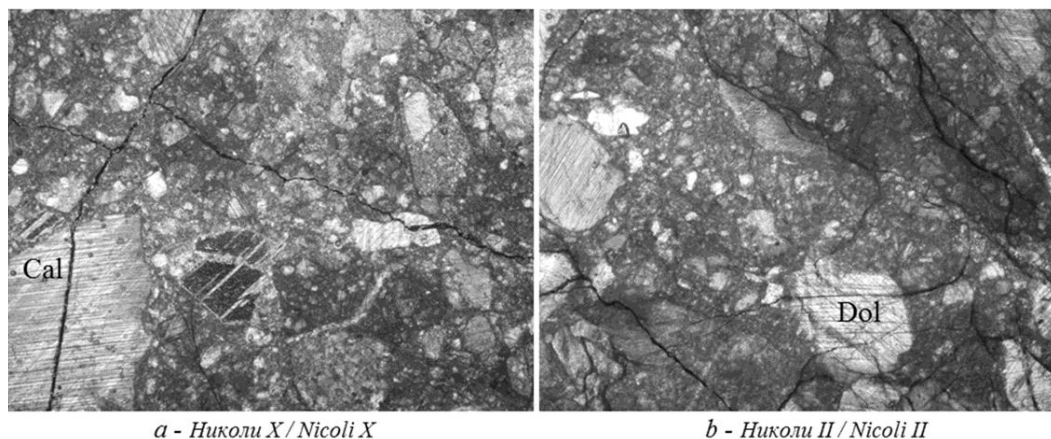


Рис. 3. Шлифы образца «Варна 1» / Fig. 3. Clips of the sample “Varna 1”

Второй образец «Варна 2» – известняк доломитистый, карбонатная брекчия. Порода сложена кальцитом, площадная доля которого на участках шлифа занимает около 90 % (рис. 4, *a*) и в меньшей степени (до 10 % площади участков) доломитом (рис. 4, *b*). Размер зерен от 0.01 до 2 мм. Структура неравномерно зернистая, псаммитовая-грубообломочная. Полуокатанные и угловатые зерна, сцементированные кальцитовым спаритом (>0.01 мм) образуют брекчевидную текстуру. Следует отметить также имеющуюся трещиноватость породы (рис. 4).

*a - Никולי X / Nicoli X**b - Никולי II / Nicoli II**Рис. 4. Шлифы образца «Варна 2» / Fig. 4. Clips of the sample “Varna 2”*

Из минералогического анализа испытуемых образцов следует, что пластическое разрушение образца «Варна 1» может быть обусловлено его слоистой однородной текстурой. Наличие кальцитовых прожилков указывает на первичную трещиноватость, приобретенную и залеченную в ходе воздействия тектоники. Кроме этого, преобладание в нем зерен песчанистой размерности приводит к тому, что каркас образца ослаблен, начинает разрушаться уже при незначительной внешней нагрузке и малой энергии деформации, поэтому УНЧ сигналы ЭМИ не проявляются (рис. 1, *a*). Сделанный вывод также подтверждается графиком нагрузки (рис. 1, *b*).

При анализе образца «Варна 2», обладающего большей плотностью при тех же размерах, наблюдается блочная брекчевидная текстура, имеющая трещиноватости породы. Микроструктура относительно твердая и может выдерживать определенную нагрузку (рис. 1, *d*). Все это соотносится с характерными особенностями хрупкого разрушения образца, которые рассмотрены в работе [Вострецов и др., 2013]. В ней отмечается способность более прочных и хрупких пород «накапливать упругую энергию без интенсивного трещинообразования» перед началом видимого разрушения. Подобные различия в отношении прочностных свойств испытуемых образцов наблюдались также при проведении экспериментальных исследований с применением испытательной машины INSTRON 5967 по одноосному сжатию образцов гранита, отличающихся по минералогическому и химическому составу [Заалишвили и др., 2017].

Поскольку электромеханические дипольные переходные процессы часто происходят на бортах и вершинах трещин [Xiaoyan et al., 2018], то это может быть связано с одним из возможных механизмов генерации ЭМИ. На этапе развития дислокаций и микротрещин с последующим их слиянием происходит интенсивное нарастание системы трещин, что приводит к возникновению УНЧ сигнала ЭМИ в интервале нагрузки 15–35 секунд (рис. 1, *d*).

Не исключено также, что определенную роль может играть дислокационный механизм возникновения медленных поляризационных эффектов под воздействием нагрузки, который приводит к генерации низкочастотного электромагнитного поля, описанный в работе [Hadjicontis, Mavromatou, 1994]. В ней приводятся результаты экспериментов по обнаружению достаточно интенсивных низкочастотных электрических сигналов (порядка 1–2 Гц), возникающих при одноосном сжатии образцов гранита и известняка.

Таким образом, при нагружении образца «Варна 2» его грубообломочная структура и брекчевидная текстура способствуют образованию и развитию системы трещин, а вместе с тем и порождению УНЧ ЭМИ. Полученные результаты показали, что насту-

пление критической стадии разрушения горных пород может сопровождаться ЭМИ не только в высокочастотном, но также и в УНЧ диапазоне.

Выводы

В статье рассмотрены особенности проявления УНЧ сигналов ЭМИ при одноосном нагружении двух различных образцов известняка, а также возможные причины, влияющие на характеристики ЭМИ, такие как прочность, состав и микроструктура образцов.

На основе анализа спектров компонент магнитной индукции установлено, что максимальная амплитуда сигналов проявляется в ультранизкочастотной части спектра (ниже 5 Гц) для более плотного образца известняка, обладающего блочной брекчевидной текстурой. Для другого образца, в котором преобладают зерна песчанистой размерности, характерно его разрушение при незначительной внешней нагрузке, которое не сопровождается УНЧ сигналами ЭМИ.

Применяемая аппаратура на основе ММПМИ позволяет ее использовать для регистрации и выделения на фоне техногенного магнитного шума малоамплитудных сигналов магнитной индукции, возникающих в процессе разрушения образцов горных пород под воздействием внешней нагрузки в виде одноосного сжатия, создаваемого ручным гидравлическим прессом.

Проведенные исследования показывают целесообразность и перспективность экспериментов с использованием ММПМИ при изучении разрушения образцов горных пород по их индикаторам, проявляющимся в УНЧ магнитных сигналах для установления возможных механизмов их генерации при физическом моделировании разрушения образцов горных пород, а также изучения деструктивных процессов в геологической среде, порождающих УНЧ ЭМИ.

Литература

1. Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Изучение временных изменений напряженного состояния геосреды в процессе разрушения. // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49. № 5. – С. 461–470.
2. Вострецов А.Г., Кривецкий А.В., Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е. Характеристики электромагнитного излучения горных пород при их разрушении в лабораторных экспериментах. // Доклады АН ВШ РФ. – 2013. – № 2(21). – С. 46–54.
3. Заалишвили В.Б., Бирюлин С.В., Козлова И.А., Мельков Д.А., Юрков А.К. Закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.
4. Заалишвили В.Б., Магкоев Т.Т., Туаев Г.Э. Влияние механического воздействия и криогенных условий на физико-химические характеристики горных пород. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №1. – С. 17–23. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9475.
5. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2000. – 231 с.
6. Лось В.Ф., Лементуева Р.А., Ирисова Е.Л. Решение аппаратно-методических проблем и изучение электромагнитного излучения в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород. // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46. № 4. – С. 14–24.
7. Матюков В.Е. Практические результаты электромагнитно мониторинга сейсмоактивных зон (обзор). // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11. № 4. – С. 15–23.
8. Машенко А.В., Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных пород. Пермь: Изд. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 176 с.
9. Свяжина И.А., Пучков В.Н., Иванов К.С., Петров Г.А. Палеомагнетизм ордовика Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 135 с.
10. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. – 270 с.

11. Сокол-Кутыловский О.Л. Магнитомодуляционные датчики на основе аморфных ферромагнитных сплавов для измерения слабых магнитных полей. // Физические основы приборостроения. – 2022. – Т. 11. № 4(46). – С. 45–48. DOI: 10.25210/jfor-2204-MS.
12. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ, 2000. – 447 с.
13. Шестаков А.Ф., Тягунов Д.С. 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.
14. Флоренский П.В., Милосердова Л.В., Балицкий В.П. Основы литологии: учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 105 с.
15. Chengwu L., Shuai F., Cheng G., Tianyu W., Beijing X. Characteristics and generation mechanism of ULF magnetic signals during coal deformation under uniaxial compression. // Journal of Geophysics and Engineering. – 2018. – No. 15. – pp. 1137–1145. DOI: 10.1088/1742-2140/aaac59.
16. Hadjicontis V., Mavromatou C. Transient electric signals prior to rock failure under uniaxial compression. // Geophysical Research Letters. – 1994. – Vol.21. No 16. – pp. 1687–1690.
17. Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms. // Reviews of Geophysics. – 1993. – Vol. 31. No. 2. – pp. 117–132. DOI: 10.1029/93RG00820.
18. Shrivastava A. Are pre-seismic ULF electromagnetic emissions considered as a reliable diagnostics for earthquake prediction? // Current Science. – 2014. – Vol. 107. No 4. – pp. 596–600.
19. Tyagunov D.S., Shestakov A.F. Recording of ultra-low frequency electromagnetic emission during loading of a rock sample. // Measurement Techniques. – 2024. – Vol. 67. – pp. 545–552. DOI: 10.1007/s11018-024-02375-1.
20. Wang E., He X. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock. // Chinese Journal of Geophysics. – 2000. – Vol. 43. No. 1. – pp. 131–137. DOI: 10.1002/cjg2.17.
21. Xiaoyan S., Xuelong L., Zhonghui L., Zhibo Z., Fuqi C., Peng C., Yongjie L. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors. // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 148. – pp. 216–225. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.

References

1. Belikov V.T., Shestakov A.F. Study of temporary changes in the stress state of the geological environment during the destruction process. *Geology and Geophysics*. 2008. Vol. 49. No. 5. pp. 461–470. (In Russ.)
2. Vostretsov A.G., Krivetsky A.V., Bizyaev A.A., Yakovitskaya G.E. Electromagnetic radiation characteristics of rocks under destruction in laboratory experiments. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2013. No. 2(21). pp. 46–54. (In Russ.)
3. Zaalishvili V.B., Biryulin S.V., Kozlova I.A., Melkov D.A., Yurkov A.K. Patterns of Manifestation of Anomalies of Radon Volumetric Activity Before Earthquakes in Various Seismically Active Regions. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Magkoev T.T., Tuaeve G.E. The Influence of Mechanical Impact and Cryogenic Conditions on the Physical and Chemical Characteristics of Rocks. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No. 1. pp. 17–23. DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9475. (In Russ.)
5. Kurlenya M.V., Vostretsov A.G., Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E. Registration and processing of electromagnetic radiation signals. Novosibirsk. SB RAS Publishing. 2000 p. (In Russ.)
6. Los V.F., Lementueva R.A., Irisova E.L. Solving hardware and methodological problems and studying electromagnetic radiation in laboratory experiments on rock destruction. *Seismic Instruments*. 2010. Vol. 46. No. 4. pp. 14–24. (In Russ.)
7. Matyukov V.E. Practical results of electromagnetic monitoring of seismoactive zones (review). *Bulletin of KRSU*. 2011. Vol. 11. No 4. pp. 15–23 (In Russ.)
8. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Special sections of soil mechanics and rock mechanics. Perm. Publ. of Perm National Research Polytechnic University. 2014.

176 p. (In Russ.)

9. Svyazina I.A., Puchkov V.N., Ivanov K.S., Petrov G.A. Paleomagnetism of the Ordovician Urals. Yekaterinburg. UB RAS Publishing. 2003. 270 p. (In Russ.)

10. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. Physics of Earthquakes and Precursors. Moscow. Nauka. 2003 p. (In Russ.)

11. Sokol-Kutylovsky O.L. Magnetomodulatory sensors based on amorphous ferromagnetic alloys for measuring weak magnetic fields. Physical foundations of instrumentation. 2022. Vol. 11. No 4. pp. 45–48. DOI: 10.25210/jfop-2204-MS. (In Russ.)

12. Surkov V.V. Electromagnetic effects in earthquakes and explosions. Moscow. MIFI. 2000. 447 p. (In Russ.)

13. Shestakov A.F., Tyagunov D.S. A technique for identification of spectral characteristics of electromagnetic radiation signals recorded during loading of rock samples against the background of technogenic magnetic noise. Devices and methods of measurements. 2025. Vol. 16. No. 3. pp. 191–201. DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-191-201. (In Russ.)

14. Florensky P.V., Miloserdova L.V., Balitsky V.P. Fundamentals of lithology: A textbook. Moscow. Publishing house of Gubkin RSU of Oil and gas. 2003. 105 p. (In Russ.)

15. Chengwu L., Shuai F., Cheng G., Tianyu W., Beijing X. Characteristics and generation mechanism of ULF magnetic signals during coal deformation under uniaxial compression. Journal of Geophysics and Engineering. 2018. No. 15: pp. 1137–1145. DOI: 10.1088/1742-2140/aaac59.

16. Hadjicontis V., Mavromatou C. Transient electric signals prior to rock failure under uniaxial compression. Geophysical Research Letters. 1994. Vol. 21. No 16. pp. 1687–1690.

17. Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms. Reviews of Geophysics. 1993. Vol. 31. No. 2. pp. 117–132. DOI: 10.1029/93RG00820.

18. Shrivastava A. Are pre-seismic ULF electromagnetic emissions considered as a reliable diagnostics for earthquake prediction? Current Science. 2014. Vol. 107. No 4. pp. 596–600.

19. Tyagunov D.S., Shestakov A.F. Recording of ultra-low frequency electromagnetic emission during loading of a rock sample. Measurement Techniques. 2024. Vol. 67. pp. 545–552. DOI: 10.1007/s11018-024-02375-1.

20. Wang E., He X. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock. Chinese Journal of Geophysics. 2000. Vol. 43. No. 1. pp. 131–137. DOI: 10.1002/cjg2.17.

21. Xiaoyan S., Xuelong L., Zhonghui L., Zhibo Z., Fuqi C., Peng C., Yongjie L. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors. Journal of Applied Geophysics. 2018. Vol. 148. pp. 216–225. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.11.018.