

ВЫДЕЛЕНИЕ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦА КРАСНОЦВЕТНОГО АЛЕВРОЛИТА НА ФОНЕ ТЕХНОГЕННОГО МАГНИТНОГО ШУМА

© 2025 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 27.07.2024; после доработки 14.07.2025; принята в печать 25.09.2025

Представлены результаты лабораторных наблюдений за вариациями магнитной индукции с использованием магнитомодуляционных датчиков, позволивших осуществить регистрацию сигналов электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне 0.01–200 Гц, генерируемого образцом красноцветного алевролита в процессе одноосного его нагружения. Приведено описание аппаратуры и методики измерений, используемых при проведении эксперимента. Применяемое программное обеспечение позволяет выделять ультранизкочастотные сигналы ЭМИ из первичной записи вариаций магнитной индукции на фоне общего магнитного шума техногенного происхождения и при этом сохраняет их информативность. Установлено, что при разрушении образца горной породы, максимальная амплитуда сигналов ЭМИ проявляется в ультранизкочастотной части спектра. Применяемые 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, магнитный шум.

ВВЕДЕНИЕ

По изучению низкочастотного электромагнитного излучения (ЭМИ), предвещающего геодинамические события, накоплен большой экспериментальный материал данных, в котором возрастание ультранизкочастотных (УНЧ) сигналов магнитной индукции, наблюдается от нескольких часов и дней до начала землетрясений в частотном диапазоне 0.01–40 Гц на расстояниях от десятков до сотен километров (Матюков, 2011; Сурков, 2000; Park et al., 1993; Shrivastava, 2014 и др.).

Теоретические исследования в этом направлении сводятся в основном к рассмотрению возможных механизмов применительно к большим пространственным масштабам, свойственным очагам подготовки землетрясений (Сурков, 2000). Например, в работе (Surkov et al., 2003) предложен механизм генерации УНЧ электромагнитного шума ансамблем трещин и приведены математические выкладки, характеризующие специфику его

появления за несколько часов до некоторых сильных землетрясений в ближней и дальней зонах.

В немногочисленных публикациях приводятся модель и теоретические расчеты, обосновывающие возможность генерации ЭМИ УНЧ диапазона, в процессе разрушения горных пород. В частности, в работах (Molchanov, Hayakawa, 1995, 1998) показано, что образующиеся при этом электрические заряды на бортах раскрывающихся трещин в результате релаксации способны продуцировать микроток, вызывающие УНЧ электромагнитную эмиссию, а также породить широкополосный магнитный шум герцового диапазона.

В то же время известно (Сурков, 2000), что регистрация УНЧ излучения сопряжена с определенными трудностями, вызванными естественными шумами (ионосферного и магнитосферного происхождения), а также помехами техногенного генезиса, обусловленными влиянием наземных передающих радиостанций, высоковольтных линий передач и обычных

силовых сетей, питающих электрифицированное оборудование. Особенно остро эта проблема возникает, когда интенсивность информативного сигнала по амплитуде соизмерима с уровнем естественного или техногенного шума, а ее решение может быть достигнуто с использованием аппаратных ресурсов в процессе измерения или программных средств обработки измеренных данных.

В исследованиях по разработке методов прогнозирования землетрясений важное место отводится физическому моделированию этих геодинамических событий на образцах горных пород в процессе проведения лабораторных экспериментов (Бизяев, Яковицкая, 2015; Лось и др., 2010; Мулев и др., 2019; Соболев, 1993). Проведение таких исследований связано с одной из фундаментальных проблем геофизики, относящейся к изучению механизмов формирования очага землетрясения по индикаторам его проявления в физических полях (Лось и др., 2010; Соболев, 1993; Соболев, Пономарев, 2003; Сурков, 2000 и др.).

В работе (Лось и др., 2010) показано, что нагружение образца, завершающееся его частичным или полным разрушением, является аналогом землетрясения в натуральных условиях и вызывает изменения различных свойств материала образца. При этом, цитируемые авторы утверждают, что мониторинг таких изменений и последующая математическая обработка полученных данных, дают возможность «поиска в ходе лабораторных экспериментов закономерностей изменения физических полей, которые можно было бы использовать в качестве предвестников разрушения образцов горных пород» и далее по аналогии «попытаться отыскать подобные предвестники» геодинамических событий в естественных условиях.

В лабораторных экспериментах крайне редко применяются методы регистрации ЭМИ, генерируемого в процессе нагружения образцов горных пород в УНЧ диапазоне, с целью поиска закономерностей появления информативных сигналов в электромагнитном поле, которые можно использовать в качестве индикаторов разрушения (Лось и др., 2010). Это связано, преимущественно, с тем, что оборудование, используемое при проведении подобных экспериментов, представляет собой мощный источник электромагнитных помех (Лось и др., 2010). Следует также отметить, что помимо УНЧ диапазона, такие проблемы возникают и при регистрации ЭМИ в высокочастотном диапазоне при нагружении образцов горных пород (Вострецов и др., 1997; Курленя и др., 2000; Мешков и др., 2022).

Кроме этого, с развитием техногенной инфраструктуры городов, непрерывным уве-

личением энергопотребления в быту и в промышленности, развитием всех видов транспорта, особенно на электрической тяге, а также с расширением сети линий электропередач разного уровня, охватывающих огромную площадь поверхности Земли, согласно работам (Беляев и др., 2003; Колесник и др., 2007; Тягунов, 2018; Туагунов, 2018) назрела необходимость учитывать электромагнитный шум техногенного происхождения, особенно при проведении лабораторных экспериментов регистрации УНЧ сигналов. Техногенный электромагнитный шум, создаваемый крупными городами и промышленными центрами, преимущественно сосредоточен в области частот 0.01–100 Гц и многократно превосходит по амплитуде вариации геомагнитного поля в данном диапазоне (Колесник и др., 2007; Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2012; Туагунов, 2018).

Под техногенным магнитным шумом обычно понимают нерегулярные низкочастотные электромагнитные колебания. Все источники техногенного электромагнитного шума можно разделить на первичные и вторичные (Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2009). К первичным источникам относятся источники, которые сами создают электромагнитное поле (все линии электропередач постоянного и переменного тока любой частоты; движущиеся ферромагнитные сплавы и электромагнитные источники, имеющие свой собственный магнитный момент, который при перемещении в пространстве или при вращении создает электромагнитное поле). К вторичным источникам относятся источники, которые преобразуют изменение воздействующего на них электромагнитного поля во вторичное магнитное поле, которое складывается с первичным полем. Это источники, связанные с проявлением эффектов и явлений электромагнитной индукции и самоиндукции в металлических проводниках, а также источники вторичного магнитного поля, возникающие при движении металлических немагнитных проводников во внешнем магнитном поле.

В настоящей работе рассмотрен метод выделения информативного УНЧ сигнала ЭМИ малой амплитуды, генерируемого образцом горной породы под воздействием внешней нагрузки в виде одноосного сжатия, на фоне магнитного шума техногенного происхождения в диапазоне частот 0.01–200 Гц.

ПРИМЕНЯЕМАЯ АППАРАТУРА

Для измерения сигналов ЭМИ применен трехкомпонентный магнитомодуляционный преобразователь магнитной индукции (Сокол-Кутыловский, 2009). Диапазон частот

измеряемого сигнала 0.01–200 Гц. Порог чувствительности в указанном диапазоне частот ≤ 1 пТл при коэффициенте преобразования 178.5 мВ/нТл. Более подробно характеристики применяемой аппаратуры приведены в работе (Тягунов, Шестаков, 2024а).

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

В лабораторном эксперименте измерялась амплитуда трех взаимно ортогональных компонент магнитной индукции: вертикальной B_z и двух горизонтальных B_x , B_y , причем одна из горизонтальных компонент B_x имела направление по магнитному меридиану. Датчик преобразователя магнитной индукции фиксировался на немагнитном штативе, установленном на расстоянии ~450 мм от образца.

Для проведения эксперимента использовался образец красноцветного алевролита осадочной породы кубической формы с ребром 23 мм. В отличие от образца базальта, использованного в работе (Тягунов, Шестаков, 2024б), выбор этого образца был обусловлен тем, что осадочные породы обладают низким пределом прочности (Флоренский и др., 2003) на одноосное сжатие, а значит, энергия деформации в процессе внешней нагрузки, перед тем как наступит критическая стадия его хрупкого разрушения, будет сопровождаться сигналами ЭМИ малой амплитуды. Размер ребра (23 мм) образца был выбран из-за удобства его фиксации между верхней и нижней плитами пресса.

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. После фиксации образца в прессе на него непрерывно оказывали нагрузку в виде одноосного сжатия, при которой плавно увеличивалось давление от 0 МПа до 2 МПа с интенсивностью порядка 0.02 МПа/секунду.

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

Перед началом проведения эксперимента в лаборатории Института геофизики УрО РАН была проведена запись вариаций техногенного магнитного шума с целью оценки его значений.

На записях компонент магнитной индукции (рис. 1) значение амплитуды B_x составило 80 нТл, B_y — 100(110) нТл, B_z — 70 нТл. Под фрагментами магнитограмм приведены соответствующие им спектры магнитного шума.

На спектрограммах рис. 1 хорошо отобразились линии с частотами 50 Гц и ее кратных гармоник, вызванные магнитным полем рассеяния от электрификации различного оборудования, расположенного в здании Института геофизики УрО РАН. Также, на спектрограммах видно, что амплитуда техногенного шума во всей низкочастотной области спектров, распределена равномерно и за вычетом частоты 0.5 Гц составила для всех компонент магнитной индукции не более ~0.02 нТл. Указанные уровни амплитуды характеризуют низкочастотный магнитный шум техногенного происхождения типичный для конкретного местоположения лаборатории, в которой проводился эксперимент с красноцветным алевролитом.

На рис. 2 представлены результаты измерения, полученные в процессе проведения эксперимента. На двухминутных магнитограммах записей компонент магнитной индукции амплитуда техногенного магнитного шума значительно превышает УНЧ сигналы ЭМИ. Сплошной магнитный шум за исключением некоторых коротких импульсов ЭМИ (20, 96, 102, 106 секундах) вызван магнитным полем рассеяния сетевой частоты и ее гармоник, а также другими источниками переменного магнитного поля от различного оборудования, сосредоточенного в здании Института. В подтверждение этому на рис. 2 приведены полные спектры магнитного шума, а в (табл. 1) значения амплитуд частоты 50 Гц и ее кратных гармоник.

Из сопоставления амплитудных спектров (рис. 1, 2) видно, что на рис. 2 помимо основной сетевой частоты 50 Гц и ее первых гармоник наблюдается также распределение спектральной плотности низкочастотных гармоник в интервале до 40 Гц. Это дает основание полагать, что именно воздействие внешней нагрузки на образец порождает соответствующие им сигналы ЭМИ.

В интервале нагружения от 1.5 МПа до 2 МПа в образце начался процесс трещинообразования, связанный с изменением его напряженно-деформированного состояния и приводящий к формированию в образце системы микротрещин, их прорастанию и слиянию. Увеличение на образец нагрузки до критической (2 МПа) привело к его фрагментарному разрушению, сопровождающемуся появлением и раскрытием трещин (рис. 3). При этом давление на манометре пресса быстро снизилось с 2 МПа до 0 МПа.

Поскольку амплитудные значения УНЧ сигналов ЭМИ на фоне магнитного шума очень

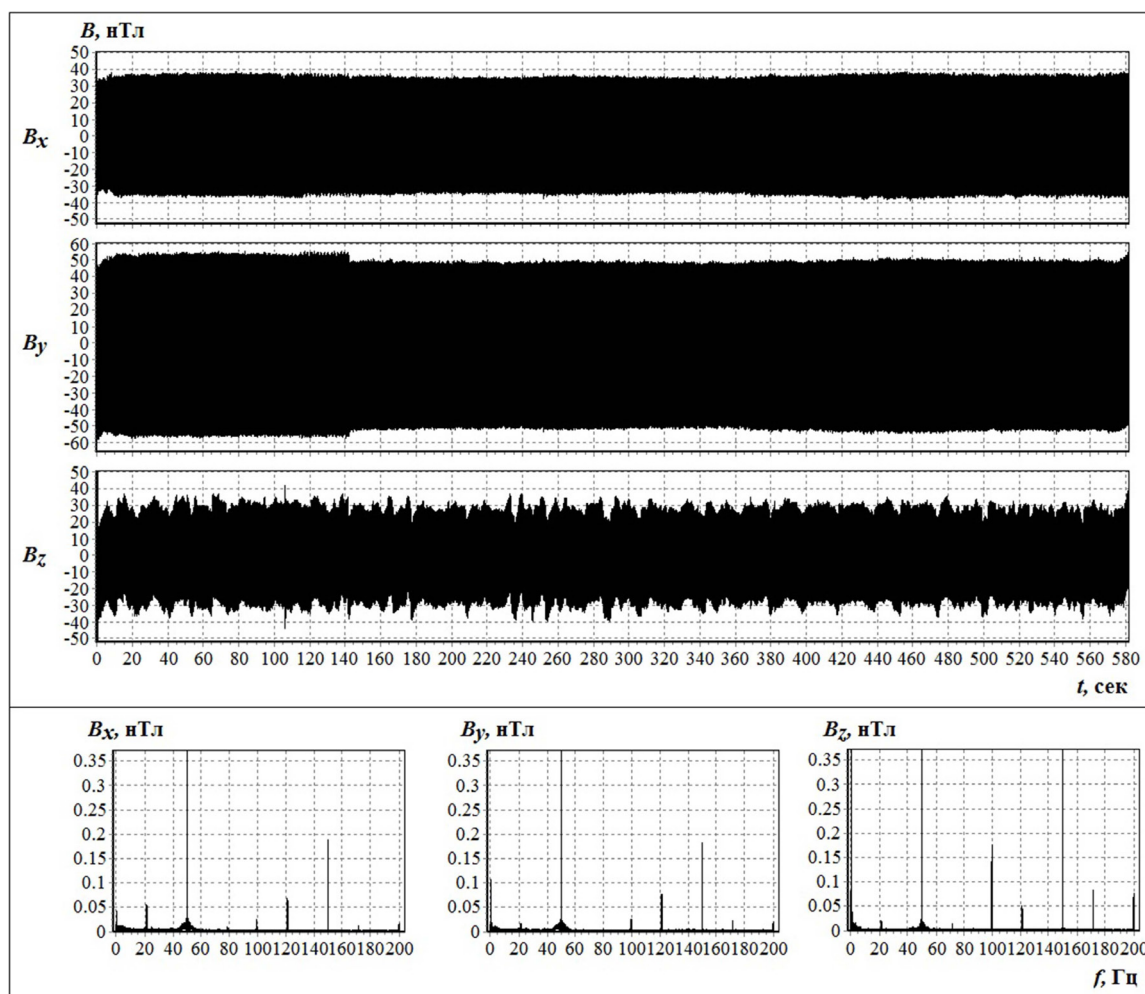


Рис. 1. Фоновые записи компонент техногенного магнитного шума и соответствующие им амплитудно-частотные спектры магнитной индукции. B_x , B_y , B_z — компоненты магнитной индукции.

Fig. 1. Background records of technogenic magnetic noise components and corresponding amplitude-frequency spectra of magnetic induction. B_x , B_y and B_z are the components of magnetic induction.

малы, то на первичных записях (рис. 2) сложно выделить моменты как фрагментального разрушения, так и появления магистральных трещин, а также оценить их форму импульса и амплитуду.

Для уменьшения магнитного шума исходного сигнала, был проведен анализ частотного спектра, в котором применен полосовой фильтр низких частот. При помощи фильтра все частоты выше 45 Гц были срезаны, а амплитудно-частотные спектры, для наглядности, развернуты (детализированы) до частоты 10 Гц.

При значительном подавлении магнитного шума УНЧ сигналы ЭМИ становятся более четкими (рис. 4) и можно сделать вывод о том, что основное разрушение образца происходит в интервале времени 95–112 секунд, а на 96 секунде визуально наблюдается образование магистральных трещин, что вызвало появление аномальных сигналов в записи всех трех компонент магнитной индукции. В тоже время, на стадии нагружения, предшествующей образова-

нию магистральных трещин, импульсы ЭМИ с некоторой корреляцией и значительными различиями характера флуктуаций (форма сигнала имеет вид импульсов колебаний) проявились на горизонтальных компонентах вариаций и менее выражены в вертикальной компоненте.

Сравнивая магнитограммы первичной записи компонент магнитной индукции (рис. 2) с записями после обработки (рис. 4), можно заметить, что значения амплитуд ЭМИ на 96, 102 и 106 секундах на этих записях отличаются в 2–5 раза (от пика до пика). По-видимому, магнитный шум, сосредоточенный вблизи сетевой частоты 50 Гц, состоит из серии близко расположенных пиков и сплошь заполненных участков, то есть имеет достаточно сложную структуру. Это хорошо видно на спектрограммах (рис. 2). Суперпозиция сигналов магнитного поля близких частот (отдельные пики на этом участке спектра) дает суммарную амплитуду сигнала, намного превышающую ту, что расположена строго на

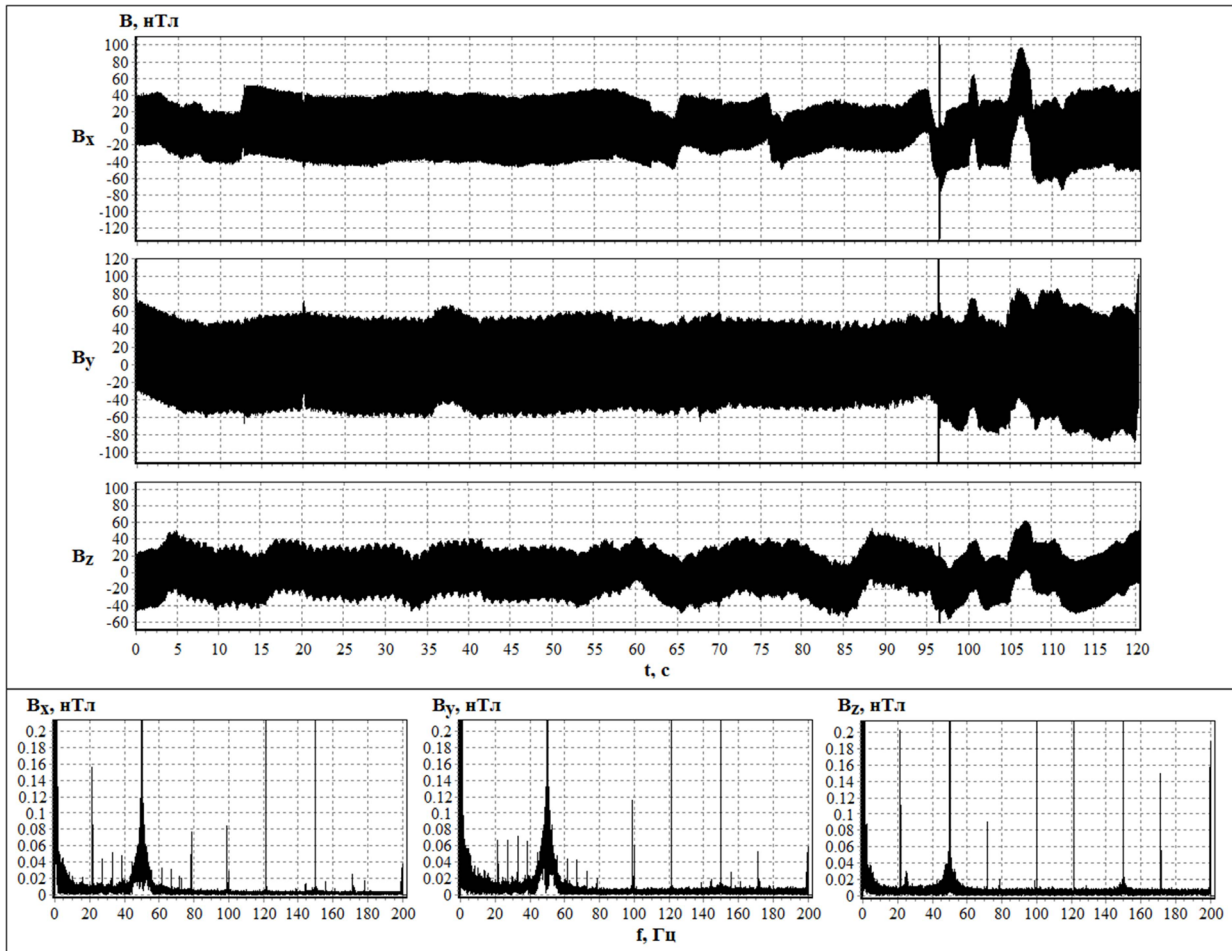


Рис. 2. Записи вариаций техногенного магнитного шума и УНЧ сигналов ЭМИ с их амплитудно-частотными спектрами магнитной индукции. B_x , B_y , B_z — компоненты магнитной индукции.

Fig. 2. Recordings of variations of technogenic magnetic noise and ultra-low frequency EM emission signals with their amplitude-frequency spectra of magnetic induction. B_x , B_y and B_z are the components of magnetic induction.

Таблица 1. Значения амплитуд сетевой частоты 50 Гц и ее первых гармоник компонент магнитной индукции

Table 1. Values of the amplitudes of the 50 Hz network frequency and its first harmonics of the magnetic induction components

Компоненты магнитной индукции	50 Гц, нТл	100 Гц, нТл	150 Гц, нТл	200 Гц, нТл
B_x	17	0.1	0.8	0.05
B_y	26	0.1	1	0.05
B_z	14	0.3	1.5	0.2

Рис. 3. Пример образования магистральных трещин в образце красноцветного алевролита под воздействием на него внешней нагрузки.

Fig. 3. An example of the formation of main cracks in a sample of red-colored siltstone under the influence of an external load.



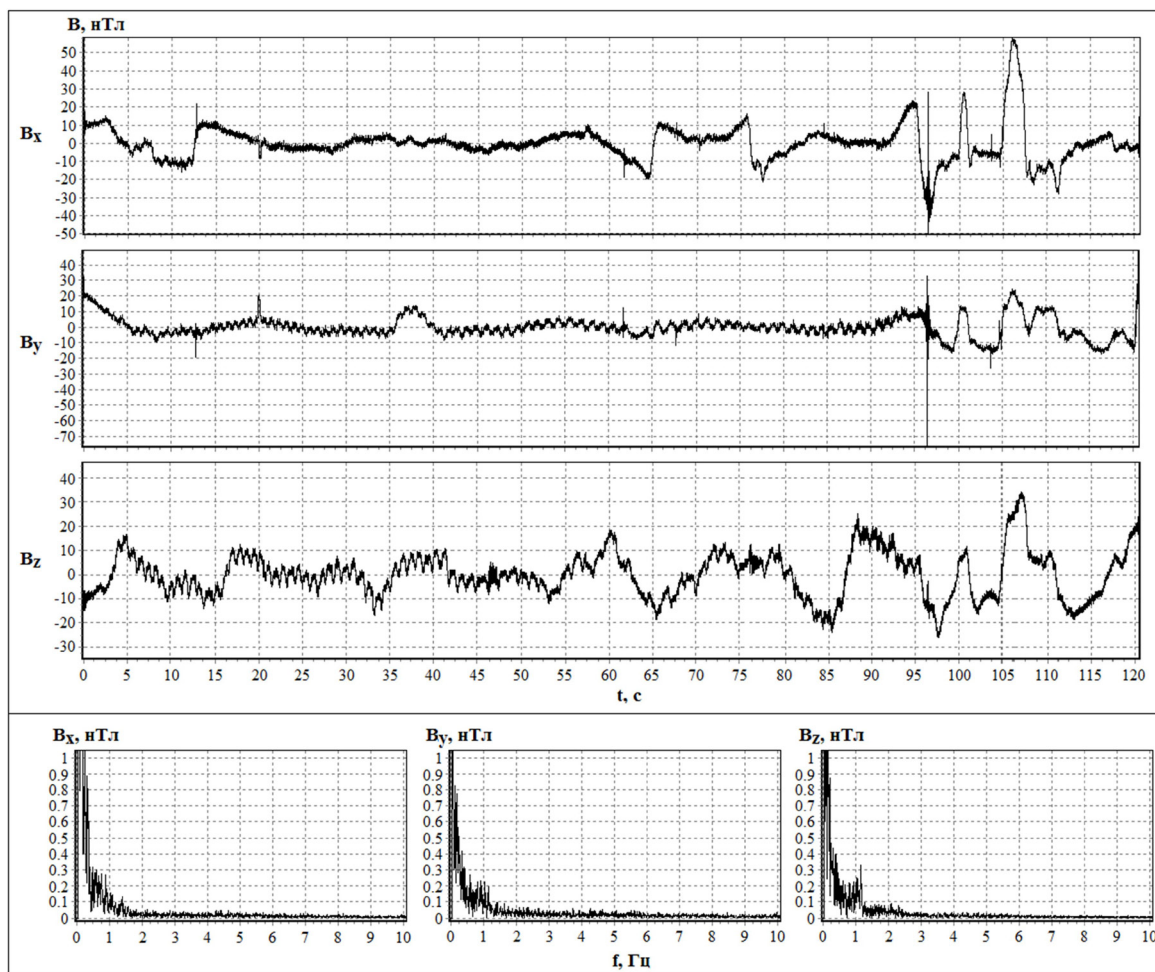


Рис. 4. УНЧ сигналы ЭМИ с их амплитудно-частотными спектрами магнитной индукции после обработки. B_x , B_y , B_z — компоненты магнитной индукции.

Fig. 4. Ultra-low frequency of EM emission signals with their amplitude-frequency spectra of magnetic induction after processing. B_x , B_y and B_z are the components of magnetic induction.

данной частоте. То же самое наблюдается и на гармониках сетевой частоты. Амплитуда магнитной индукции в низкочастотной части спектра (рис. 2) имеет выраженный шумовой характер, поэтому она может иметь достаточно высокую интенсивность. На амплитудно-частотных спектрах (рис. 4) видно, что начиная с частоты ~6 Гц происходит нарастание амплитуды, а с ~2 Гц амплитуда спектра смещается из высокочастотной области в низкочастотную. Для наглядности амплитудные значения частот, расположенных на спектрограмме (рис. 4) ниже 0.25 Гц представлены в (табл. 2).

Таким образом, результаты наблюдений за вариациями магнитной индукции, полученные с использованием магнитомодуляционных датчиков, показывают принципиальную возможность регистрации и выделения малоамплитудных УНЧ сигналов ЭМИ в процессе нагружения образцов горных пород в лабораторных условиях на фоне техногенного магнитного шума.

Таблица 2. Значения амплитуд ультранизкочастотной части спектра рис. 4

Table 2. Values of the amplitudes of the ultra-low frequency part of the spectrum fig. 4

Частота, Гц	B_x , нТл	B_y , нТл	B_z , нТл
0.05	3	2.3	3.5
0.1	1.5	0.5	2.5
0.15	2	—	1.5
0.25	1	0.5	0.5

ВЫВОДЫ

Применяемая аппаратура на основе магнитомодуляционного преобразования магнитной индукции позволяет использовать ее для регистрации УНЧ электромагнитного излучения и особенностей его проявления в магнитном поле вследствие различных причин природного или техногенного происхождения, связанных с разрушением горных пород, а также при поиске

индикаторов (предвестников) геодинамических событий.

Предложенный нами метод обработки полученных данных и извлечения информативных УНЧ сигналов ЭМИ из общего техногенного магнитного шума дает практическую возможность применить его в угольной и рудной промышленности при контроле состояния массивов горных пород при их разработке и эксплуатации по электромагнитному излучению на фоне повышенного магнитного шума различного происхождения.

На основе анализа амплитудно-частотных спектров для компонент магнитной индукции установлено, что максимальная амплитуда сигналов ЭМИ проявляется в ультранизкочастотной части спектра, что позволяет считать их индикаторами процесса разрушения, пригодными для выработки прогностических критериев при изучении состояния массивов горных пород в условиях естественного залегания.

Список литературы [References]

- Беляев Г.Г., Чмырев В.М., Клейменова Н.Г., Козырева О.В.* Электромагнитный ультранизкочастотный фон мегаполиса (г. Москва) // Геоматизм и аэрономия. 2003. Т. 43. № 5. С. 697–701 [*Belyaev G.G., Chmyrev V.M., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V.* Ultra-low-frequency electromagnetic background of a megalopolis (Moscow) // Geomagnetism and aeronomy. 2003. V. 43. № 5. P. 650–653 (in Russian)].
- Бизяев А.А., Яковицкая Г.Е.* О контроле динамических проявлений горного давления с использованием усовершенствованной аппаратуры регистрации сигналов ЭМИ // ФТПРПИ. 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)].
- Колесник А.Г., Колесник С.А., Бородин А.С. и др.* Электромагнитный фон городских территорий диапазона промышленных частот // Вестник Том. гос. ун-та. 2007. № 297. С. 161–164 [*Kolesnik A.G., Kolesnik S.A., Borodin A.S. et al.* Electromagnetic background of urban areas of the industrial frequency range // Vestnik Tomsk of the State University. 2007. № 297. P. 161–164 (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 аппаратно-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.* Solving hardware and methodological problems and studying electromagnetic radiation in laboratory experiments on rock destruction // Seismic instruments. 2010. V. 46. № 4. P. 14–24 (in Russian)].
- Матюков В.Е.* Практические результаты электромагнитно мониторинга сейсмоактивных зон (обзор) // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 4. С. 15–23 [*Matyukov V.E.* Practical results of electromagnetic monitoring of seismoactive zones (review) // Bulletin of KRSU. 2011. V. 11. № 4. P. 15–23 (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)]. http://dx.doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_135
- Мулев С.Н., Старников В.Н., Романевич О.А.* Современный этап развития геофизического метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) // Уголь. 2019. 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 (EM) // Ugol. 2019. P. 6–14 (in Russian)]. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-6-14>
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 312 с. [*Sobolev G.A.* Fundamentals of earthquake forecasting. Moscow: Nauka, 1993. 312 p (in Russian)].
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники / Отв. ред. В.Н. Страхов. М.: Наука, 2003. 270 с. [*Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Physics of Earthquakes and Precursors / Executive editor V.N. Strakhov. Moscow: Nauka. 2003. 270 p (in Russian)].
- Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С.* Об источниках городского низкочастотного электромагнитного шума // Уральский геофизический вестник. 2009. № 1(14). С. 59–64 [*Sokol-Kutylovsky O.L., Tyagunov D.S.* About the sources of urban low-frequency electromagnetic noise // Ural Geophysical Bulletin. 2009. № 1(14). P. 59–64 (in Russian)].
- Сокол-Кутыловский О.Л.* Автопараметрический датчик магнитной индукции // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 37–39 [*Sokol-Kutylovsky O.L.* Autoparametric magnetic induction sensor // Sensors and systems. 2009. № 1. P. 37–39 (in Russian)].
- Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С.* Влияние техногенных магнитных полей на геомагнитные измерения в обсерваториях // Измерительная техника. 2012.

- № 9. С. 58–60 [Sokol-Kutylovskii O.L., Tyagunov D.S. The effect of technogenic magnetic fields on geomagnetic measurements in observatories // Measurement techniques. 2012. № 9. P. 58–60 (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: MEFPhI, 2000. 447 p (in Russian)].
- Тягунов Д.С. Распределение городского техногенного магнитного шума в зависимости от расстояния (на примере Екатеринбурга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 1(37). С. 84–91 [Tyagunov D.S. Distribution of urban technogenic magnetic noise depending on distance (on the example of Yekaterinburg) // Vestnik KRAUNTS. Earth Sciences. 2018. № 1(37). P. 84–91 (in Russian)].
- Тягунов Д.С., Шестаков А.Ф. Регистрация ультранизкочастотного электромагнитного излучения при нагружении образца горной породы // Измерительная техника. 2024а. № 73(7). С. 52–59 [Tyagunov D.S., Shestakov A.F. Registration of ultra-low-frequency electromagnetic emission during loading of a rock sample // Measuring technique. 2024a. № 73(7). P. 52–59 (in Russian)]. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-7-52-59>
- Тягунов Д.С., Шестаков А.Ф. Регистрация магнитомодуляционным датчиком низкочастотного электромагнитного излучения в лабораторных экспериментах по разрушению образцов горных пород // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2024б. № 3(63). С. 18–28 [Tyagunov D.S., Shestakov A.F. Registration of low-frequency electromagnetic emission by a magnetomodulation sensor in laboratory experiments on the destruction of rock samples // Vestnik KRAUNTS. Earth Sciences. 2024b. № 3(63). P. 18–28 (in Russian)]. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-3-63-18-28>
- 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. [Florensky P.V., Miloserdova L.V., Balitsky V.P. Fundamentals of lithology: A textbook. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2003. 105 p (in Russian)].
- Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R. et al. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms // Reviews of Geophysics. 1993. V. 31. № 2. P. 117–132. <https://doi.org/10.1029/93RG00820>
- Molchanov O.A., Hayakawa M. Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing // Geophysical Research Letters. 1995. V. 22. № 22. P. 3091–3094. <https://doi.org/10.1029/95GL00781>.
- Molchanov O.A., Hayakawa M. On the generation mechanism of ULF seismogenic electromagnetic emissions // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1998. V. 105. P. 201–210. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(97\)00091-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(97)00091-5)
- Shrivastava Abhishek. Are pre-seismic ULF electromagnetic emissions considered as a reliable diagnostics for earthquake prediction? // Current Science. 2014. V. 107. № 4. P. 596–600.
- Surkov V.V., Molchanov O.A., Hayakawa M. Pre-earthquake ULF electromagnetic perturbations as a result of inductive seismomagnetic phenomena during microfracturing // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2003. V. 65. № 1. P. 31–46. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00117-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00117-7)
- Tyagunov D.S. Distribution of manmade low-frequency magnetic noise in a big industrial city // Izvestiya, atmospheric and oceanic physics. 2018. V. 54. № 7. P. 700–704. <https://doi.org/10.1134/S0001433818070162>

EXTRACTION OF ULTRA-LOW FREQUENCY SIGNALS OF ELECTROMAGNETIC EMISSION DURING LOADING A SAMPLE OF RED SILTSTONE AGAINST THE BACKGROUND OF TECHNOGENIC MAGNETIC NOISE

D.S. Tyagunov, A.F. Shestakov

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

Received Yule 27, 2025; revised Yule 14, 2025; accepted September 25, 2025

The article presents the results of observations of magnetic induction variations using magnetomodulation sensors. Electromagnetic (EM) emission signals in the range of 0.01–200 Hz generated by a sample of red siltstone under uniaxial loading process in a laboratory experiment were registered. Equipment and methods of measurement are described. The software used makes it possible to extract ultra-low frequency EM emission signals from the primary recording of magnetic induction variations against the background of general magnetic noise of technogenic origin, while preserving their information content. It is shown that after the rock sample is destroyed, the maximum amplitude of the EM emission signals appears in the ultra-low frequency part of the spectrum. It is established that magnetomodulation sensors have sufficient sensitivity and resolution to register EM emission signals in the frequency range 0.01–200 Hz, which appears when rock samples are destroyed during their loading.

Keywords: destruction of rock samples, electromagnetic emission, magnetic noise.