

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 622.83:550.343

**АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
РЕГИСТРАЦИИ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ
ОБРАЗЦАМИ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ИХ РАЗРУШЕНИЯ**

©2026 г. Д. С. Тягунов*, А. Ф. Шестаков

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича
Уральского отделения Российской академии наук
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100
e-mail: tds-07@mail.ru

Поступила в редакцию 17.02.2026 г.

После доработки 03.03.2026 г.

Принята к публикации 20.03.2026 г.

Представлены результаты аппаратурно-методического сопровождения эксперимента, позволившего осуществлять регистрацию сигналов электромагнитного излучения в диапазоне частот 0.01–200 Гц, наблюдаемых при разрушении образцов горных пород в процессе их одноосного нагружения на фоне магнитного шума техногенного происхождения в лабораторных условиях. Приведено описание аппаратуры, использующей магнитомодуляционные преобразователи магнитной индукции, а также сопутствующего оборудования и методики измерений. Рассмотрены примеры одноосного нагружения двух различных образцов горной породы. При близких режимах нагрузки испытываемых образцов амплитуда записи магнитограмм первого образца сопоставима с фоновыми значениями техногенного магнитного шума, а второго в несколько раз их превышает. Сделан вывод о том, что чувствительность магнитомодуляционного преобразователя с автопараметрическим усилением сигнала позволяет применять его для регистрации ультранизкочастотных сигналов электромагнитного излучения в процессе разрушения образцов горных пород в условиях помех техногенного магнитного шума.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных аспектов изучения электромагнитного излучения (ЭМИ), наблюдаемого при различных геодинамических явлениях в геологической среде, является лабораторный эксперимент, в котором на образцах горных пород моделируются процессы подготовки землетрясений [1, 2]. Однако в этих исследованиях крайне редко применяются методы регистрации генерируемого при этом ЭМИ в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне. Согласно работе [2], это связано с необходимостью разработки соответствующей аппаратуры, а также с тем, что экспериментальное оборудование представляет собой мощный источник техногенных электромагнитных помех широкого частотного диапазона.

В то же время, в работе [3] экспериментально показано, что при разрушении образцов кварца, гранита и известняка ЭМИ может проявлять себя также в виде электрических УНЧ-сигналов в форме флуктуаций электрического потенциала, измеренного электрометром в непосредственной близости от них.

Для регистрации сигналов ЭМИ обычно используются емкостные датчики, выполненные в виде антенн конденсаторного типа с плоскими или цилиндрическими обкладками, ферритовые антенны стержневой или тороидальной конструкции, а также электромагнитные штыревые антенны, направленные на источник сигнала [4, 5]. Показавшие хорошие результаты в кило–мегагерцовом диапазонах, эти типы датчиков имеют некоторые недостатки: сложность в осуществлении синхронных компонентных измерений магнитного поля, а также необходимость их размещения вблизи испытуемого образца.

Как правило, в геофизике для измерения слабого магнитного поля низких частот используют индукционные и феррозондовые датчики, а также сверхчувствительные магнитометры (СКВИД-магнитометры).

Индукционные датчики позволяют проводить компонентные измерения, но имеют разную чувствительность на различных измеряемых частотах [6]. Для увеличения чувствительности индукционных датчиков требуется либо существенно увеличивать их размеры (что не соответствует требованиям малых габаритов измерительного датчика), либо применять ферромагнитные сердечники, которые вносят дополнительные погрешности за счет подмагничивания сердечника внешним магнитным полем. Кроме этого, они фиксируют не магнитную индукцию, а ее производную ($\partial B/\partial t$), что затрудняет их применение для регистрации сложных быстро меняющихся во времени сигналов. Например, если задать магнитный сигнал в форме меандра, то, согласно работе [7], на выходе индукционный датчик покажет два коротких импульса с разными полярностями (по фронту и по спаду меандра) и, таким образом, исказит по фазе и амплитуде до неузнаваемости не только сигнал, но и его спектры.

У феррозондовых датчиков при измерении магнитного поля ниже 20 Гц возрастают собственные шумы датчика. К тому же они потребляют значительную энергию накачки и имеют недостаточный порог чувствительности. Совершенствование феррозондовых магнитометров и применение в них новых материалов предполагало использование их взамен индукционных датчиков, однако, поскольку они работают на второй гармонике частоты возбуждения, они значительно уступают по порогу чувствительности индукционным датчикам [8].

Самые высокочувствительные векторные СКВИД-магнитометры, основанные на эффекте Джозефсона в сверхпроводниках и используемые для измерения очень слабых магнитных полей, до сих пор остаются слишком дорогими и сложными в эксплуатации, так как они работают при температуре жидкого гелия [9, 10]. Согласно работе [11], появившиеся высокотемпературные СКВИД-магнитометры могут работать при температуре жидкого азота, однако по порогу чувствительности в области низких частот они уступают низкотемпературным.

Кроме перечисленных выше типов датчиков, также известны магнитомодуляционные преобразователи (ММП) с сердечником из аморфного ферромагнитного сплава, работающие в режиме автопараметрического усиления сигнала магнитной индукции, разработанные в Институте геофизики УрО РАН. Они, в отличие от индукционных датчиков [12, 13], измеряют составляющую вектора магнитной индукции B , а не производную $\partial B/\partial t$.

Более двадцати лет трехкомпонентные ММП с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции использовались в геофизических исследованиях при изучении влияния техногенного магнитного шума на результаты обсерваторских наблюдений [14], при измерении амплитуды геомагнитного шума низких частот [15], при поиске сульфидных месторождений по фазовому параметру с накоплением сигнала и GPS-синхронизацией [16]. Поскольку проведенные выше исследования показали, что ММП надежно регистрирует переменное магнитное поле в частотном диапазоне от 0.01 Гц до 1 кГц с чувствительностью около 1 пТл (и менее), его можно использовать при изучении характеристик электромагнитных УНЧ-сигналов и особенностей их проявления в магнитном поле, обусловленных различными причинами природного или техногенного происхождения, в том числе связанными с разрушением горных пород. В этой связи представляется целесообразным осуществить регистрацию магнитных УНЧ-сигналов, генерируемых образцами горных пород в процессе воздействия на них внешней нагрузки, с применением технических средств измерения магнитного поля.

На основании изложенного выше целью работы является рассмотрение возможности применения трехкомпонентной магнитометрической аппаратуры, использующей ММП, для

синхронной регистрации УНЧ-сигналов ЭМИ, генерируемых образцами горных пород под воздействием внешней нагрузки в виде одноосного сжатия, создаваемого ручным гидравлическим прессом.

Задачами исследования являются выделение и идентификация УНЧ-сигналов ЭМИ, возникающих в процессе разрушения образцов горных пород на фоне магнитного шума техногенного происхождения при проведении лабораторных экспериментов.

2. АППАРАТУРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Для проведения лабораторного эксперимента по регистрации сигналов ЭМИ был применен измерительный комплекс, состоящий из полевой магнитометрической аппаратуры, гидравлического пресса и цифровой видеокамеры.

Из рассмотренных ранее датчиков и отношения сигнал/шум в магнитометре использован трехкомпонентный ММП, выполненный на основе аморфных ферромагнитных сердечников и работающий в режиме автопараметрического усиления сигнала. Принцип действия ММП с автопараметрическим усилением был опубликован в работе [17], а его принципиальная техническая схема – в работе [18]. Диапазон частот измеряемого магнитного сигнала составляет 0.01–200 Гц. Амплитудно-частотная характеристика плоская. Порог чувствительности в указанном диапазоне частот – не более 1 пТл. Частота дискретизации сигнала равна 471 Гц.

В магнитометре реализовано два режима работы. В первом режиме коэффициент преобразования ММП составляет 150 мВ/нТл, что при нижней частоте полосы пропускания 0.01 Гц позволяет регистрировать магнитное поле амплитудой менее 10 пТл, а в режиме накопления сигнала – менее 0.1 пТл на частотах выше 1 Гц. Динамический диапазон измерений при этом составляет 120 нТл (от пика до пика) [18]. Во втором режиме для возможности работы ММП в магнитном поле Земли коэффициент преобразования составляет 150 мкВ/нТл [19], что значительно расширяет динамический диапазон измеряемых сигналов магнитной индукции.

Для исключения вибрационных помех ММП закреплены в ортогонально выполненных отверстиях в оргстекле, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда. Установочная система из ММП жестко зафиксирована на немагнитной опоре размерами под штатив.

Выходные сигналы каждой из компонент ММП подавались на многоканальный 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь AD7734 производства фирмы Analog Device, выход которого соединен с переносным компьютером, управляющим работой аналого-цифрового преобразователя и сохраняющим данные измерений в цифровом виде в отдельный текстовый файл.

В качестве прессового оборудования использован ручной гидравлический одноосный пресс марки WK-18 производства фирмы Zarzad Sprzetu с классом точности 0.5, рассчитанный на максимальную нагрузку 100 т. Поскольку пресс установлен на бетонном полу и на массивном тяжелом металлическом основании, это исключало какие-либо его микросмещения или колебания в процессе экспериментов.

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.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Предварительно перед проведением измерений в лабораторных условиях проводилась калибровка магнитометрической аппаратуры с использованием системы колец Гельмгольца и Браунбека. Калибровка каждого ММП проводилась отдельно по трем компонентам магнитной индукции B_x , B_y , B_z . При этом компонента B_x направлена по магнитному меридиану, компонента B_y ортогональна направлению магнитного меридиана, компонента B_z направлена вертикально. По каждой компоненте ММП располагался по направлению оси колец.

Система колец Гельмгольца использовалась как образцовый источник слабого магнитного поля, коэффициент преобразования которого по току достаточно точно рассчитывается по геометрическим размерам системы с использованием формул для аксиальной компоненты магнитной индукции на оси кругового витка с током. Технические расчеты по катушкам Гельмгольца представлены в работе [20].

Система колец Браунбека, разработанная в Институте Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, использовалась для компенсации горизонтальной составляющей Земного магнитного поля с высокой степенью однородности. Техническое описание колец Браунбека, использованное для расчетов, представлено в работе [21].

В лабораторных экспериментах измерялась амплитуда трех взаимно ортогональных компонент магнитной индукции: вертикальной B_z и двух горизонтальных B_x , B_y . Ориентация ММП относительно сторон света такая же, как при калибровке. Для исключения в процессе измерений каких-либо колебаний или вибрации ММП их установочная система фиксировалась на немагнитном штативе, расположенном на бетонном полу на расстоянии 45 см от образца.

Для проведения экспериментов были взяты два образца кубической формы с ребрами сторон 23 мм. Для сравнения и оценки влияния магнитных свойств, а также возможного воздействия механических элементов пресса при его работе на генерацию ЭМИ, были использованы два различных образца (магнитный и немагнитный). После каждой фиксации

образцов между верхней и нижней плитами гидравлического пресса на них непрерывно оказывалась нагрузка в виде одноосного сжатия, при которой давление плавно увеличивалось от нуля до 5.5 МПа с интенсивностью порядка 0.05 МПа/с.

Видеозапись нагружения, так же, как и регистрация сигналов ЭМИ, проводилась синхронно от начала увеличения нагрузки на образец до полного его разрушения. Для обработки данных видеопотока была применена программа VirtualDub 1.10.4, при помощи которой видеофайлы разбивались на кадры, с каждого из которых в текстовый файл формировался 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.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении любого эксперимента, связанного с регистрацией сигналов ЭМИ, особенно в УНЧ-диапазоне, возникают трудности подавления высокого фона техногенных помех (связанных с сетевой частотой 50 Гц) и выделения на их фоне полезного информативного сигнала. Кроме этого, на результаты измерений может оказывать влияние сопутствующее эксперименту оборудование [2, 22].

С целью оценки амплитудно-частотных характеристик сигналов ЭМИ, проявляющихся при трещинообразовании и разрушении образцов горных пород с фоновыми флуктуациями, перед началом эксперимента в экспериментальной лаборатории в режиме реального времени были зарегистрированы сигналы техногенного магнитного шума в полосе частот 0.01–200 Гц. В этой же полосе частот были получены результаты двух экспериментов. Для подавления на исходных записях магнитограмм техногенного шума был проведен анализ их частотного спектра, а затем применен полосовой фильтр низких частот, при помощи которого все частоты выше 30 Гц были срезаны.

На рис. 1 показана запись фона магнитного шума в полосе пропускания 0.01–30 Гц. По горизонтальным компонентам магнитной индукции B_x , B_y амплитуда магнитного шума составила 5 и 4 нТл; по вертикальной B_z (за вычетом отдельных импульсов) 20 нТл. Из приведенных значений следует, что амплитуда одной из горизонтальных компонент B_x по отношению к амплитуде другой горизонтальной компоненты B_y имеет близкие значения, а вертикальная компонента B_z по отношению к B_x , B_y отличается в 4–5 раз. Согласно работе [14], в суммарном техногенном магнитном поле множества источников амплитуда вертикальной

составляющей, как правило, превышает амплитуду горизонтальных составляющих магнитной индукции.

Рис. 1. Записи вариаций магнитного шума техногенного происхождения компонент магнитной индукции

На рис. 2 и 3 представлены результаты двух экспериментов регистрации сигналов ЭМИ совместно с фоном магнитного шума техногенного происхождения в полосе пропускания 0.01–30 Гц. Начало нагружения образца на магнитограммах компонент магнитной индукции и графике нагрузки рис. 2 соответствует 10-й секунде, окончание – 112-й секунде; на рис. 3 – 20-й и 80-й секундам соответственно. Регистрации сигналов ЭМИ в процессе нагружения испытуемых образцов на магнитограммах и графике нагрузки рис. 2 предшествует 10-секундный, а на рис. 3 – 20-секундный интервал фоновой записи вариаций магнитного шума без нагрузки. Аналогичные по длительности интервалы приведены также и после уменьшения нагрузки в результате разрушения образцов (см. рис. 2, 3). Это сделано для того, чтобы оценить уровень шума во время проводимых экспериментов и показать, что его интенсивность не оказывает влияния на последующее выделение информативного магнитного сигнала, обусловленного разрушением образца (см. рис. 3).

Рис. 2. Записи магнитограмм (а) и график нагрузки (б) немагнитного образца

Рис. 3. Записи магнитограмм (а) с построенными для них спектрами (в) и график нагрузки (б) магнитного образца

Сравнивая магнитограммы и графики нагрузки на рис. 2 и 3, можно отметить следующее. При приложенной к образцам непрерывной внешней нагрузки в виде одноосного сжатия она составила близкие значения (5.3–5.5 МПа), которые свидетельствуют о близких прочностных свойствах образцов. В обоих экспериментах увеличение нагрузки на образцы вызвало в них изменение напряженно-деформированного состояния и привело к формированию в них системы микротрещин, а на этапе разрушения – к их прорастанию и слиянию с образованием магистральных трещин. При нагружении образцов давление на манометре пресса плавно возрастало до пиковой нагрузки, а при достижении критического напряженно-деформированного состояния образцов оно быстро снизилось с 5.3–5.5 МПа до нуля. Несмотря на это, УНЧ-сигналы ЭМИ проявились на записях магнитограмм только во втором эксперименте (см. рис. 3).

В результате проведения первого эксперимента (см. рис. 2) записи магнитограмм по всем компонентам магнитной индукции имеют равномерный ход (без ярко выраженных перепадов), подобный шумовым дорожкам записей магнитограмм рис. 1. Незначительные вариации компонент B_x , B_y , B_z рис. 2 сопоставимы по амплитуде с вариациями магнитного

шума компонент магнитной индукции на рис. 1 и имеют близкие значения. Отсутствие на записи магнитограмм рис. 2 УНЧ-сигналов ЭМИ во всей полосе пропускания, вероятно, связано с тем, что немагнитный образец не обладал способностью их генерации по тем или иным причинам, обсуждение которых выходит за рамки данной статьи.

Следует заметить, что разрешающая способность ММП позволяет зафиксировать магнитную индукцию, вызванную незначительными колебаниями возвратно-поступательных движений штока механического привода прессы в процессе его работы. На магнитограммах рис. 2 это воздействие проявляется в виде пилообразной формы шумовой дорожки с предельными амплитудными значениями компонент магнитной индукции 5 нТл (от пика до пика).

Однако это влияние становится практически незаметным, когда наблюдаются сигналы ЭМИ, регистрируемые ММП в процессе разрушения образцов горных пород под воздействием внешней нагрузки. Подтверждением этому служат магнитограммы рис. 3, на которых видно, что шумовая дорожка приобрела незначительную вариацию в форме тонкой линии, на фоне которой отчетливо выражен информативный сигнал ЭМИ, обусловленный разрушением образца.

Значения амплитуд информативных УНЧ-сигналов ЭМИ, генерируемых магнитным образцом во втором эксперименте, проявились по всем составляющим магнитной индукции и составили 75 нТл для B_x , 250 нТл для B_y и 460 нТл для B_z (от пика до пика), при этом основное разрушение образца произошло во временном интервале 79.2–79.4 с. Сравнивая сигналы ЭМИ-компонент магнитной индукции рис. 3, можно отметить некоторое подобие их формы, особенно по компонентам B_y и B_z . При достижении критического напряженно-деформированного состояния образца после 77-й секунды происходит его лавинообразное разрушение, сопровождающееся высокоамплитудными сигналами компонент магнитной индукции.

По мере увеличения зоны прорастания и слияния трещин в амплитудно-частотном спектре рис. 3 монотонно нарастает низкочастотная составляющая, начиная со значения 20 Гц. Особенно четко это видно в спектре компоненты B_z . Если на спектрограммах рис. 3 выделить частоту 0.075 Гц, то амплитуды магнитной индукции B_x , B_y , B_z на этой частоте составят соответственно 0.6, 2.9, 4.3 нТл. Таким образом, приведенные значения амплитуд, полученные во втором эксперименте, показывают, что магнитометрическая аппаратура с использованием ММП позволяет регистрировать УНЧ-сигналы ЭМИ, сопровождающиеся критической стадией разрушения горных пород.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяемая магнитометрическая аппаратура на основе ММП с автопараметрическим усилением сигнала дает возможность осуществлять регистрацию УНЧ-сигналов ЭМИ и выявлять особенности их проявления в магнитном поле при разрушении образцов горных пород, что позволяет рассчитывать на ее применение для изучения геодинамических процессов, протекающих в геологической среде.

В результате регистрации УНЧ-сигналов магнитной индукции при помощи трехкомпонентного ММП и последующей обработки данных была получена полная информация об амплитудно-частотных характеристиках ЭМИ, генерируемого магнитным образцом горной породы. Полученная информация при дополнении ее данными минералогического анализа может позволить уточнить возможный механизм генерации УНЧ-импульсов ЭМИ, обусловленный, по мнению авторов, процессом разделения и движения зарядов при развитии дислокаций в зонах концентрации напряжений, а также перестройкой доменов при образовании и росте трещин в испытуемом образце.

При анализе проведенных исследований установлено, что прессовое оборудование, используемое в экспериментах, не оказывает какого-либо значительного влияния на результаты измерений. Используемый фильтр низких частот на основе дискретного преобразования Фурье для выделения УНЧ-сигналов ЭМИ из общего магнитного шума эффективно подавляет помехи техногенного происхождения, не искажая при этом исходный сигнал, и дает возможность выявить его характерные особенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. Москва: Наука, 2003.
2. *Лось В.Ф., Лементуева Р.А., Ирисова Е.Л.* // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 4. С. 14. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16367640>
3. *Hadjicontis V., Mavromatou C.* // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. № 16. P. <https://doi.org/10.1029/94GL00694>
4. *Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е.* Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
5. *Мулев С.Н., Старников В.Н., Романевич О.А.* // Уголь. 2019. № 10. С. 6. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-10-6-14>

6. Поляков С.В., Резников Б.И., Щенников А.В., Копытенко Е.А., Самсонов Б.В. // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 1. С. 5. <https://doi.org/10.3103/S0747923917010078>
7. Сокол-Кутыловский О.Л. // Уральский геофизический вестник. 2018. № 3(33). С. 43. <https://doi.org/10.25698/UGV.2018.3.7.43>
8. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986.
9. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Щелкин А.П. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. Ленинград: Энергия. Ленинградское отделение, 1972.
10. Введенский В.Л., Ожогин В.И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. Москва: Наука, 1986, 199 с.
11. Фалей М.И., Масленников Ю.В., Кошелец В.П. // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 1. С. 93. <https://doi.org/10.7868/S0033849415120062>
12. Сокол-Кутыловский О.Л. // Дефектоскопия. 1989. № 2. С. 92.
13. Сокол-Кутыловский О.Л. // Физика металлов и металловедение. 1997. Т. 84. № 3. С. 54.
14. Sokol-Kutylovskii O.L., Tyagunov D.S. // Meas. Tech. 2012. V. 55(9). P. 1083. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0079-8>
15. Сокол-Кутыловский О.Л. // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 2. С. 119. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.2-10>
[Sokol-Kutylovskii O. L. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55. P. 905. <https://doi.org/10.1134/S0001433819080103>]
16. Сокол-Кутыловский О.Л., Сарвартинов А.И. // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 3. С. 133. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19015495>
17. Sokol-Kutylovskii O.L. // Sens. Actuators A: Phys. 1997. V. 62/1–3. P. 496. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13257420>
18. Сокол-Кутыловский О.Л. // ПТЭ. 2019. № 4. С. 101. <https://doi.org/10.1134/S0032816219040153>
19. Сокол-Кутыловский О.Л. // ПТЭ. 2021. № 5. С. 126. <https://doi.org/10.31857/S0032816221050128>
20. Тягунов Д.С. Дис. ... канд. техн. наук. Институт геофизики УрО РАН. Екатеринбург, 2012, 119 с.
21. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Кольца Браунбека. СКБ ИЗМИРАН АН СССР, 1966.
22. Li Ch., Fu Sh., Guan Ch., Wan T., Xie B. // J. Geophys. Eng. 2018. V. 15. P. 1137. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaac59>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Записи вариаций магнитного шума техногенного происхождения компонент магнитной индукции.

Рис. 2. Записи магнитограмм (**а**) и график нагрузки (**б**) немагнитного образца.

Рис. 3. Записи магнитограмм (**а**) с построенными для них спектрами (**в**) и график нагрузки (**б**) магнитного образца.

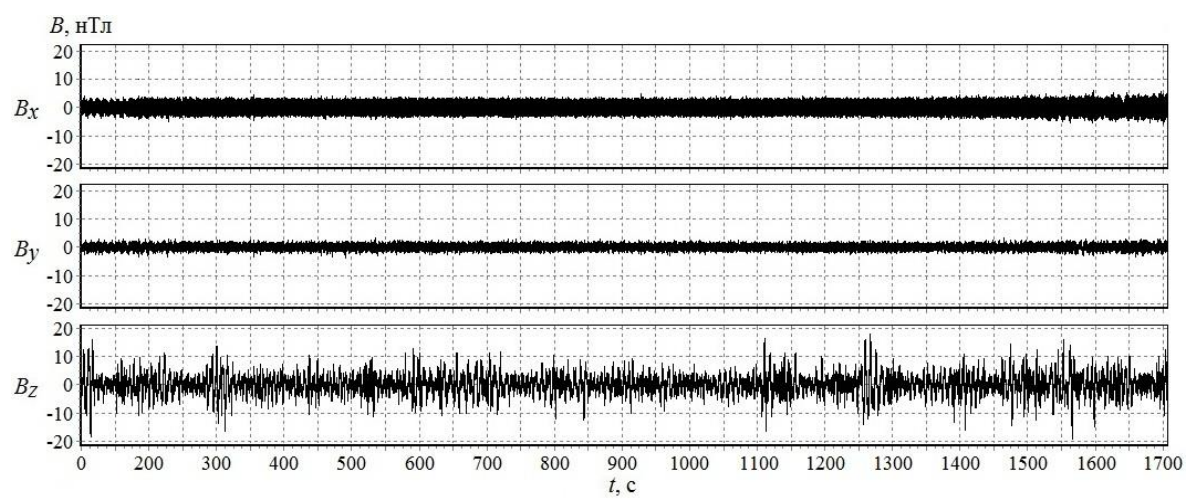


Рис. 1.

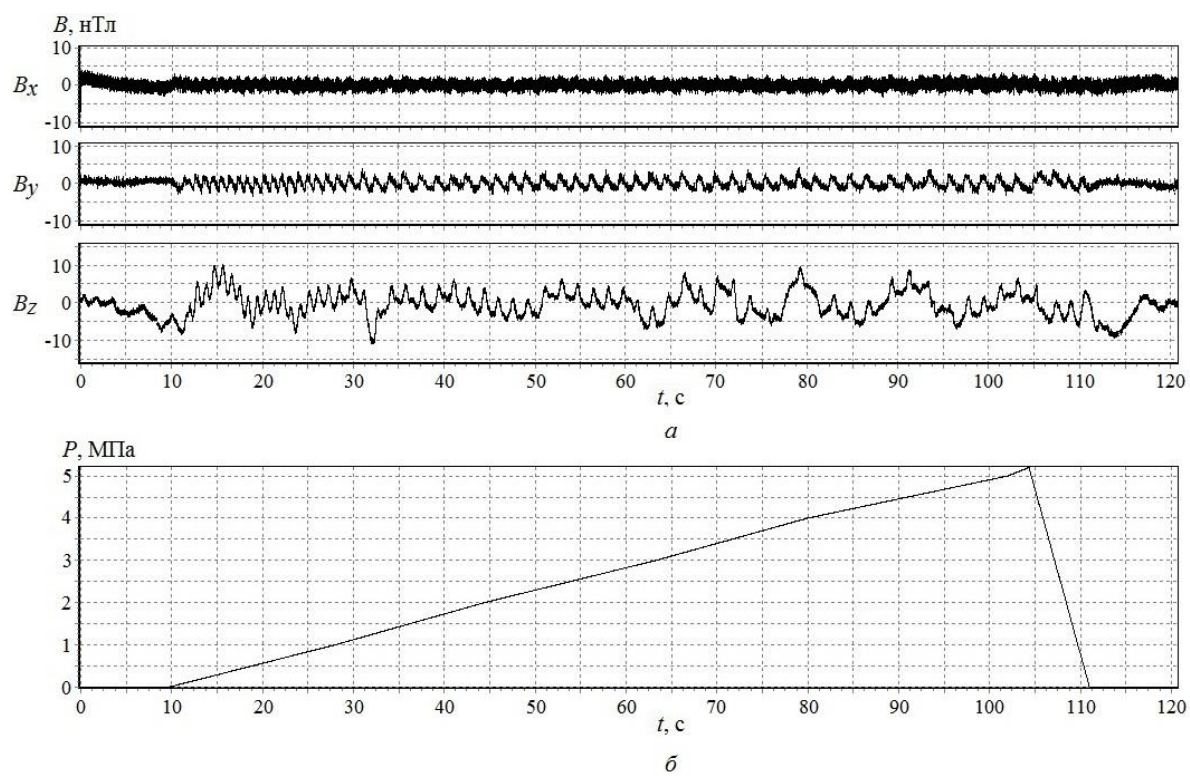


Рис. 2.

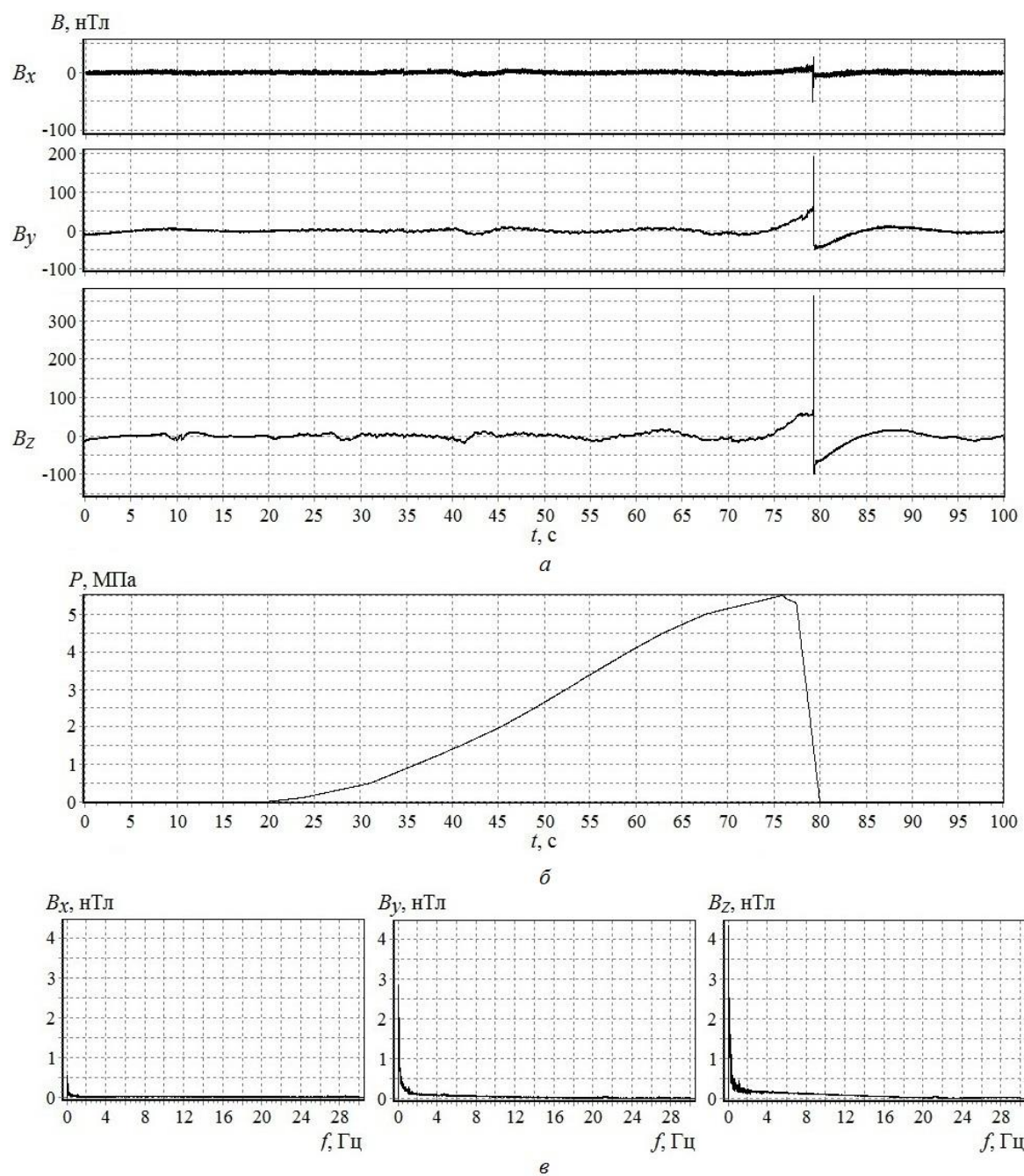


Рис. 3.