

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ИМ. А.А. ТРОФИМУКА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

КАМНЕВ ЯРОСЛАВ КОНСТАНТИНОВИЧ

**ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЯЗКОЙ
НАМАГНИЧЕННОСТИ И ЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Кожевников Н.О.
доктор геол.-минерал. наук,
профессор

Новосибирск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ, ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ	11
1.1 Введение в задачу исследования магнитной вязкости.....	11
1.2 Физика явления	14
1.3 Методы исследования магнитной вязкости	21
1.3.1 Температурные методы ZFC и FC.....	21
1.3.2. Методы исследований во временной области	22
1.3.3 Частотные методы исследования	23
1.3.4 Мёсбауэровская спектроскопия.....	24
1.4 Проявления магнитной вязкости в геофизическом методе переходных процессов.....	25
1.5 Выводы.....	28
Глава 2. РЕФЕРЕНТНАЯ БАЗА ДАННЫХ О ПРОЯВЛЕНИЯХ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ	29
2.1 Описание измерений в частотной области. Основные понятия, определения, параметры.....	30
2.2 Аппаратура для исследования магнитной вязкости в частотной области	33
2.2 Образцы для исследования магнитной вязкости	35
2.2.1 Витимские базальты (1).....	35
2.2.2 Витимские базальты (2).....	35
2.2.3 Образцы горна	35
2.2.4 Магнитная фракция из отвалов археологического раскопа	36
2.2.5 Образцы туфов	36
2.2.6 Образцы африканского песка	37
2.2.7 Образцы кирпичей	37
2.3 Результаты измерения магнитной вязкости образцов Витимских базальтов	38
2.4 Экспериментальная оценка погрешности измерений магнитной вязкости в частотной области	41
2.4.1 Влияние температуры и положения образца на погрешность измерения магнитной восприимчивости.	43
2.4.2 Анализ погрешностей измерения параметров ($\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$) и FD	45
2.5 Результаты измерения магнитной вязкости коллекции образцов.	53

2.5.1 Образцы горна	53
2.5.2 Образцы африканского песка	55
2.5.3 Образцы кирпичей	55
2.5.4 Образцы туфов	56
2.5.4 Магнитная фракция из отвалов археологического раскопа	56
2.6 Выводы.....	57
Глава 3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.....	58
3.1 Импульсная характеристика намагниченности	61
3.2 Лабораторная установка для измерения импульсной характеристики намагниченности	62
3.3 Методика измерений.....	63
3.4 Первый этап	67
3.5 Второй этап.....	69
3.6 Сравнение катушек	74
3.5 Обсуждение результатов измерений.....	75
3.6 Выводы.....	77
Глава 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧЕННОСТИ	79
4.1 Математическое моделирование импульсных характеристик намагниченности при различных параметрах распределения размеров частиц.....	80
4.2 Инверсия синтетических импульсных характеристик.....	84
4.3 Оценка эффективности инверсии синтетических импульсных характеристик	88
4.4 Выводы.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	94
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	107
Приложение А	108
Приложение Б.....	111
Приложение В.....	114
Приложение Г	121
Приложение Д.....	123
Приложение Е.....	125

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Магнитная вязкость, или магнитное последствие, является одним из фундаментальных свойств ферро- и ферримагнитных материалов. Это явление заключается в запаздывании во времени изменений магнитных характеристик ферро- и ферримагнетиков (намагниченности, магнитной проницаемости) по отношению к изменениям внешнего магнитного поля. Диапазон характерных времен таких изменений составляет от долей секунд до десятков тысяч лет [Трухин, 1973]. Чаще всего проявления магнитной вязкости горных пород связаны с установлением и релаксацией намагниченности однодоменных зерен ферримагнитных минералов. Если релаксация намагниченности однодоменных частиц происходит за время около 100 с и менее, такие частицы называются суперпарамагнитными (СПМ), а само явление – суперпарамагнетизмом [Dormann et al., 1997].

Магнитные свойства ультрадисперсных частиц используются для изучения истории диагенеза осадков, особенностей почвообразования, реконструкций палеоклимата. Места где почва в древности подвергалась антропогенному воздействию, например, прокаливанию, отмечаются повышенным содержанием суперпарамагнитных частиц. Мельчайшие зерна ферримагнитных минералов содержатся в изделиях из обожженной глины, древних металлургических горнах, шлаках и продуктах их дезинтеграции, оказавшихся во вмещающей почве. Наряду с осадками и почвами «контейнерами» ультрадисперсных частиц являются базальты, туфы, лавы, магнетитовые руды. В ряде случаев содержание СПМ зерен в таких горных породах характеризуется зональностью, которая отражает особенности их строения и генезиса.

В настоящее время для обнаружения, оценки содержания и в ряде случаев изучения распределения частиц по их размерам (магнитная гранулометрия) используют различные методы и параметры. Из числа

быстрых, простых и сравнительно дешевых методов отметим те из них, что основаны на результатах измерений параметров гистерезиса и магнитной восприимчивости на двух или более частотах, а также на определении безгистерезисной и изотермической остаточной намагниченности. Эффективными методами магнитной гранулометрии являются мёссбауэровская спектроскопия и измерение магнитных параметров в области низких температур. Известен также метод магнитной гранулометрии, основанный на измерении временного спада изотермической остаточной намагниченности после выключения внешнего намагничивающего поля, т.е. переходной характеристики намагниченности. Из перечисленных методов чаще всего используют многочастотные измерения магнитной восприимчивости. Наиболее распространенным прибором для изучения проявлений суперпарамагнетизма в частотной области является мост Bartington MS2 [Dearing, 1994], измеряющий абсолютное значение магнитной восприимчивости на двух частотах.

Таким образом, в распоряжении исследователей имеется набор методов для обнаружения и диагностики ультрадисперсных магнитных частиц. Вместе с тем этот набор не является полным. Известно, в частности, что иногда магнитная вязкость горных пород оказывает заметное или даже преобладающее по сравнению с вкладом вихревых токов влияние на результаты метода переходных процессов. Такие эффекты в своих работах рассматривали Е.Ю. Антонов, В.М. Бубнов, П.О. Барсуков, В.Ю. Задорожная, А.К. Захаркин, Ф.М. Каменецкий, Н.О. Кожевников, Г.М. Тригубович, Э.Б. Файнберг, В.В. Филатов, G. Buselli, M. Dabas, T. Lee, A. Tabbagh, J. Thiesson, J.R. Skinner.

Обычно в методе переходных процессов проявления магнитной вязкости рассматривают как помеху, затрудняющую интерпретацию индукционных переходных характеристик в терминах классического понимания электропроводности. Вместе с тем в ряде публикаций отмечается, что проявления магнитной вязкости, определённые с помощью метода

переходных процессов в условиях естественного залегания, отражают особенности генезиса и состава природных и антропогенных геологических сред и объектов, а также происходивших в приповерхностных слоях геологических процессов [Барсуков, Файнберг, 2002; Кожевников и др., 1998; Кожевников, Никифоров, 1999; Кожевников, Снопков, 1990, 1995; Barsukov, Fainberg, 2001; Kozhevnikov et al., 2001; Kozhevnikov, Nikiforov, 1995; Thiesson et al., 2007].

При лабораторных измерениях во временной области обычно регистрируется спад, т.е. переходная характеристика намагниченности. С помощью индукционных систем измеряется производная переходной характеристики, т.е. *импульсная характеристика* намагниченности [Баскаков, 1983; West et al., 1984; McCracken et al., 1986], которая свободна от влияния стабильной и/или медленно меняющейся компоненты намагниченности и первичного намагничивающего поля.

В этой связи естественным образом возникает вопрос: нельзя ли лабораторные измерения импульсных характеристик намагниченности использовать для изучения магнитной вязкости и оценки параметров, характеризующих содержание и распределение размеров ультрадисперсных магнитных зерен? Ответ на этот вопрос является основной мотивацией настоящей диссертации и определяет ее актуальность.

Объектом исследования является магнитная вязкость горных пород и её проявления в электромагнитном поле как во временной, так и в частотной областях.

Цель работы. Создание основ метода изучения магнитной вязкости и оценки параметров, характеризующих содержание и распределение размеров ультрадисперсных магнитных зерен, посредством измерения импульсных характеристик намагниченности.

Научные задачи. Разработать лабораторную индукционную установку для измерения импульсных характеристик намагниченности. Выполнить измерения и проанализировать параметры магнитной вязкости образцов

горных пород как во временной, так и частотной областях. Выполнить численное моделирование импульсных характеристик намагниченности и сравнить его результаты с лабораторными измерениями.

Фактический материал, методы исследований и аппаратура.

В качестве фактического материала использованы данные лабораторных измерений магнитной вязкости. Методика исследования магнитной вязкости в частотной области состоит в измерении разности абсолютных значений магнитной восприимчивости на различных частотах. Во временной области исследуются импульсные характеристики намагниченности. Для исследования магнитной вязкости в частотной области использовались приборы Bartington MS2 и Kappabridge MKF-1. Исследования магнитной вязкости во временной области проводились на лабораторной установке, созданной на основе полевой станции для зондирования методом переходных процессов FastSnap. Образцы для изучения магнитной вязкости были как природного, так и антропогенного происхождения, магнитная вязкость которых была установлена ранее: базальты Амалатского плато (бассейн р. Витим, Восточная сибирь); траппы и туфы Мало-Ботуобинского алмазоносного района (междуречье реки Ирелях и ручья Чуоналыр, Якутия); образцы вещества из горна для получения железа сыродутным способом; образцы кирпичей и т.д. Теоретической основой решения поставленной задачи является работа Нееля [Néel, 1949].

Защищаемые научные результаты:

1. На основе лабораторных измерений выполнен анализ и получены оценки погрешностей определения параметров магнитной вязкости, основанных на двухчастотных измерениях абсолютных значений магнитной восприимчивости. Предложены рекомендации по снижению погрешности измерений частотно-зависимой магнитной восприимчивости образцов посредством контроля различных составляющих дрейфа.

2. Измерения на образцах показали, что разработанная импульсная индукционная установка позволяет проводить экспрессное изучение

большого их числа с целью диагностики присутствия суперпарамагнитных частиц ферромагнитных минералов и оценки их содержания.

3. Экспериментальные измерения и математическое моделирование импульсных характеристик намагниченности показали, что их форма и амплитуда зависят от распределения объемов частиц, что создает предпосылки для решения обратной задачи, т.е. отыскания такого распределения, которое наилучшим образом объясняет экспериментальные импульсные характеристики.

Лично автором получены следующие **новые научные результаты**:

1. Сформирована референтная база данных параметров магнитной вязкости измеренных в частотной области на образцах различной природы. Выполнена теоретическая и экспериментальная оценка погрешностей измерения магнитной вязкости в частотной области.

2. Разработана лабораторная установка и методика измерений импульсных характеристик намагниченности образцов. Выполнена оценка погрешностей индукционной установки и возможностей исследования образцов с различным содержанием суперпарамагнитных частиц.

3. Проведено математическое моделирование импульсных характеристик намагниченности, и показана возможность описания экспериментальных импульсных характеристик намагниченности ансамблем частиц с логнормальным распределением объёмов.

4. На синтетических данных продемонстрирована принципиальная возможность решения обратной задачи по определению параметров распределения частиц в рамках логнормальной модели по импульсным характеристикам намагниченности.

Теоретическая и практическая значимость.

Разработанная методика исследования магнитной вязкости во временной области с помощью импульсной индукционной системы позволяет проводить экспрессное изучение большого числа образцов с целью обнаружения в них суперпарамагнитных частиц ферромагнитных минералов

и оценки их содержания. Лабораторные исследования импульсной характеристики намагниченности с помощью индукционных систем обладают широким временным диапазоном и дополняют имеющийся набор петромагнитных методов, используемых в магнитной гранулометрии.

Результаты математического моделирования показали, что импульсные характеристики намагниченности можно описывать моделью логнормального распределения частиц, что создаёт предпосылки к решению обратной задачи по нахождению параметров распределения.

Достоверность результатов исследования обеспечивается большим объемом экспериментальных работ, воспроизводимостью результатов при повторных измерениях, использованием современной аппаратуры, соответствием полученных результатов опубликованным данным. Математическое моделирование основано на известных теоретических положениях и алгоритмах, для расчётов использовались данные, опубликованные в ведущих научных изданиях.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались на конференциях: Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф.; Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014, X Международный научный Конгресс (8–18 апреля 2014 г., Новосибирск); Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013, IX Международный научный Конгресс (15–26 апреля 2013 г., Новосибирск); VI Всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013 (2–6 сентября 2013 г., Новосибирск); Строение литосферы и геодинамика: XXV Всероссийская молодежная конференция (23 – 28 апреля 2013 г., Иркутск); Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012, VIII Международный научный Конгресс (г. Новосибирск, 10-20 апр. 2012г.).

Автор имеет **14 печатных работ**, из которых 2 статьи по теме диссертации, опубликованные в российском журнале, входящем в перечень изданий ВАК Российской Федерации («Геология и геофизика»).

Объём и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и содержит 125 страниц текста, 25 рисунков, 11 таблиц, 6 приложений; библиография содержит 102 наименования.

Благодарности.

За неизменные поддержку и интерес к исследованиям по теме диссертации автор выражает благодарность научному руководителю Н.О. Кожевникову и коллегам – Е.Ю. Антонову, А.Ю. Казанскому, Г.Г. Матасовой, С.М. Стефаненко. За ценные советы и замечания по тексту диссертации автор признателен И.Н. Ельцову, А.К. Манштейну, В.В. Плоткину. Проведению исследований на всех этапах работы способствовала поддержка академика РАН М.И. Эпова.

Глава 1

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ, ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ

1.1 Введение в задачу исследования магнитной вязкости

Мелкодисперсные магнитные частицы привлекают интерес исследователей с 40-ых годов прошлого века, изучение их свойств является непростой научной и технической задачей [Dorman, 1997]. Значительным вкладом в понимание поведения мелкодисперсных магнитных частиц стала работа, опубликованная Неелем в 1949 г. [Néel, 1949]. Исследование малых магнитных частиц внесло большой вклад в теорию магнетизма и развитие технологий (например, в хранении данных). В последние годы интерес к мелкодисперсным магнитным частицам возрос с увеличением внимания к нанотехнологиям и к особенностям физических свойств материалов в наномасштабах.

Магнитная вязкость может быть связана с различными физическими процессами. Изменение намагниченности происходит из-за диффузии примесных атомов в магнитных минералах, изменения распределения электронной плотности молекулы (вследствие перехода электронов между ионами железа различной валентности). Магнитная вязкость может возникать вследствие передачи тепловой энергии во вращательную энергию магнитного момента. В многодоменных частицах это приводит к смещению доменных границ [Трухин, 1973].

Тепловая энергия может изменить направление намагниченности однодоменной частицы, если частица достаточно мала и температура достаточно велика [Néel, 1949]. Именно этот вид магнитной вязкости рассматривается в рамках настоящей диссертации.

Ультрадисперсные магнитные частицы присутствуют в различных типах материалов (горные породы, живые организмы, почвы, керамика,

атмосферные аэрозоли, краски, и т.д.). Поэтому, исследования суперпарамагнитных свойств могут найти применение в различных отраслях науки и техники.

Особое значение вопросы магнитного последствия имеют в магнетизме горных пород, так как практически все породы являются в той или иной степени магнитовязкими, а время нахождения пород в геомагнитном поле может исчисляться многими миллионами лет [Трухин, 1973].

Изучение свойств мелких магнитных частиц составляет важную часть палеомагнитных исследований. Вязкая остаточная намагниченность относится к разряду так называемых вторичных намагниченностей, а поскольку палеомагнитные заключения делаются на основе анализа первичной намагниченности, в палеомагнетизме существует проблема отделения или «чистки» вторичной намагниченности. Исследование свойств мелких магнитных частиц позволяет более точно определять параметры температурно-временной чистки вязкой намагниченности [Большаков, 1996].

Магнетизм ультрадисперсных частиц используется для изучения истории диагенеза осадков, особенностей педогенеза, реконструкций палеоклимата [Oldfield et al., 1981; Chang and Kirschvink, 1989; Tarduno, 1994; Verosub and Roberts, 1995; Maher, 1998; Zhou et al., 1990; Maher and Thompson, 1991; Heller and Evans, 2003; Liu et al., 2004a, 2004b, 2005; Deng et al., 2005; Xie et al., 2009; Thompson and Oldfield, 1986].

Слои почвы в местах, в древности подвергавшихся антропогенному воздействию, например, прокаливанию, отмечаются повышенным содержанием суперпарамагнитных частиц [Linford, 2005; Tabbagh, 1986]. Мельчайшие зерна ферромагнитных минералов, в том числе СПМ, содержатся в изделиях из обожженной глины, древних металлургических горнах, шлаках и продуктах их дезинтеграции, оказавшихся в почве [Кожевников, Никифоров, 1999; Kozhevnikov et al., 2001, 2003; Kozhevnikov and Nikiforov, 1995].

Наряду с осадками и почвами «контейнерами» ультрадисперсных частиц являются базальты [Казанский и др., 2012], траппы [Кожевников,

Снопков, 1995; Стогний и др., 2010], туфы [Захаркин и др., 1988], лавы [Eick and Schlinger, 1990], магнетитовые руды [Кожевников, Снопков, 1990].

В большинстве случаев при проведении геофизических съемок методом переходных процессов (МПП) эффекты магнитной вязкости слабо проявлены по сравнению с вкладом вихревых токов. Однако существуют геологические природные и антропогенные объекты, в присутствии которых эффекты магнитной вязкости становятся заметными или даже преобладающими. При исследованиях установками «петля в петле» и «однопетлевыми» влияние магнитной вязкости проявляется в виде медленно убывающей ЭДС (чаще всего, обратно пропорционально первой степени времени). При исследовании таких объектов методами импульсной индуктивной электроразведки эффекты магнитной вязкости уже нельзя игнорировать. О проявлениях магнитной вязкости упоминается все чаще по мере того, как расширяется класс объектов, которые изучают или пытаются изучить с помощью метода переходных процессов и его аналогов (ЗСБ, ЗМПП), и совершенствования аппаратуры (повышение чувствительности, расширение временного диапазона). Обычно проявления магнитной вязкости рассматривают как геологическую помеху, затрудняющую интерпретацию данных МПП в терминах «нормальной» электропроводности [Захаркин и др., 1988; Захаркин, Бубнов, 1995; Buselli, 1982; Colani and Aitken, 1966; Dabas, Skinner, 1993; Lee, 1984a, b; Pasion et al., 2002]. Так формальная интерпретация медленно убывающей ЭДС приводит к появлению не существующих в реальности слоев очень низкого удельного сопротивления [The geophysics of ..., 1980]. Вместе с тем, результаты некоторых исследований свидетельствуют о том, что измеряемые с помощью индуктивных методов эффекты магнитной вязкости отражают особенности генезиса и строения природных и антропогенных геологических сред и объектов, а также происходивших в приповерхностных слоях геологических процессов. В ряде случаев содержание СПМ зерен в таких геологических средах характеризуется зональностью, которая отражает особенности их генезиса [Барсуков, Файнберг, 2002; Кожевников и др., 1998; Кожевников,

Никифоров, 1999; Кожевников, Снопков, 1990, 1995; Eick and Schlenger, 1990; Barsukov, Fainberg, 2001; Kozhevnikov et al., 2001; Kozhevnikov, Nikiforov, 1995; Thiesson et al., 2007].

Приведённый список применения знаний о свойствах мелких магнитных частиц в геологии является не полным, но на его основании уже можно сделать вывод, что исследование свойств суперпарамагнитных частиц представляется актуальной научной проблемой.

1.2 Физика явления

Как известно, магнитные частицы имеют мультидоменную структуру, то есть они разделены на области с выделенным направлением намагниченности. Доменную структуру и форму частицы определяет баланс энергий частицы, в который входит обменное взаимодействие, магнитостатическая энергия, кристаллографическая анизотропия, анизотропия формы, энергия доменных стенок и т.д.. С уменьшением размера магнитной частицы изменяется баланс энергий, таким образом размеры доменов тоже уменьшается, и их структура может измениться, также как и структура и толщина доменных стенок. Однако наступает момент, когда энергия доменных стенок превышает магнитостатическую энергию частицы, тогда ей уже энергетически не выгодно делиться на домены и она становится однодоменной [Dorman, 1997].

Для типичных магнитных веществ характерный размер перехода частицы из мультидоменной в однодоменную лежит в диапазоне 20 – 800 нм, в зависимости от намагниченности, анизотропии и обменной энергии. Для сферических частиц характерный радиус можно рассчитать как $R_{sd} = 9 E_{\sigma} / \mu_0 M_s^2$, где M_s – намагниченность насыщения, E_{σ} – суммарная энергия доменных стенок на единицу объёма [Tebble, 1969]. Типичные значения R_{sd} – около 15 нм для железа, 35 нм для Co, 100 нм для NdFeB, и 750 нм для SmCo₅.

Энергия анизотропии формы однодоменной частицы в первом приближении пропорциональна объёму. Для одноосной анизотропии энергетический барьер, разделяющий направления лёгкого намагничивания (т.е. направления минимальной энергии спиновой системы) равен $E_B = KV$, где K – константа энергии анизотропии, V – объём частицы. Таким образом, с уменьшением размера частицы, энергия анизотропии становится сравнимой, или даже меньшей, чем тепловая энергия kT (k – постоянная Больцмана, T – температура). Если тепловой энергии хватает для преодоления энергетического барьера и инверсии намагниченности частицы, её магнитный момент испытывает тепловые флуктуации, подобно магнитному моменту отдельного атома или молекулы в парамагнитных материалах. Магнитное поведение ансамбля таких мелкодисперсных независимых магнитных частиц называется *суперпарамагнетизмом*.

Суперпарамагнитное поведение показывают частицы в определённом диапазоне размеров. Если частица слишком маленькая и почти все атомы находятся на её поверхности, электрические и магнитные свойства сильно изменяются, и описанная выше модель поведения намагниченности перестаёт работать. Это не значит, что релаксация магнитного момента частицы исчезает, просто предполагается, что она происходит по другим законам. Довольно сложно точно определить минимальный объём суперпарамагнитной частицы, так как это зависит от множества параметров. По мнению некоторых авторов, он соответствует частицам с диаметром порядка 2 нм [J.L. Dorman, 1997]. Верхний предел размеров суперпарамагнитных частиц определяется не только свойствами самой частицы (константа анизотропии K , намагниченность насыщения M_s), но так же и величиной тепловой энергии kT , и характерным временем наблюдения [эксперимента] τ_m .

Тепловые флуктуации намагниченности ультрадисперсных частиц (намагничивание и релаксация намагниченности) описывается характерным временем τ . Поэтому наблюдаемые магнитные свойства зависят от

соотношения времени наблюдения и характерного времени релаксации. Если $\tau_m \gg \tau$, магнитные частицы за время эксперимента претерпевают многократные изменение намагниченности, и ансамбль частиц имеет поведение похожее на парамагнитное (суперпарамагнитное состояние). С другой стороны, если $\tau_m \ll \tau$, релаксация проявляется очень медленно, и ансамбль частиц находится в квазистационарном состоянии (блокирующее состояние). Когда время наблюдения сравнимо с временем релаксации ансамбля суперпарамагнитных частиц ($\tau_m \approx \tau$), наблюдается постепенное изменение магнитных параметров. Подобное поведение называют *магнитовязким*.

Впервые расчёты времени релаксации τ были проведены Неелем [Néel, 1949]. Он предположил, что спины внутри частицы жёстко сцеплены и вращаются синхронно при изменении направления намагниченности. Также он предположил, что все частицы обладают одноосной анизотропией с $E_B/kT \gg 1$, где E_B – энергетический барьер, а спиновая система направлена вдоль оси лёгкого намагничивания. При таких условиях характерное время релаксации τ можно определить как [Нагата, 1965]:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{KV}{kT}\right), \quad (1.1)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\gamma_0} \frac{1}{|\lambda_S|} \sqrt{\frac{K}{G} \frac{J_{nr}}{K}} \sqrt{\frac{kT}{KV}}, \quad (1.2)$$

где γ_0 – гиромагнитное соотношение, λ_S – продольная магнитостатическая константа, и G – модуль Юнга, J_{nr} – намагниченность частицы.

Расчёты Нееля были раскритикованы Брауном [Brown, 1963], поскольку они предполагают, что намагниченность может быть ориентирована только по направлению лёгкого намагничивания. К тому же существует несколько форм анизотропии мелких магнитных частиц (магнитокристаллическая анизотропия, магнитостатическая анизотропия, поверхностная анизотропия, упругая анизотропия, и т.д.) и она не обязательно должна быть одноосной. Детальное изучение этого вопроса представляется серьёзной научной задачей

в каждом отдельном случае. Применимо к геофизике, приближение Нееля хорошо описывает экспериментальные данные, поэтому используют в основном его.

Для оценки времени релаксации ансамбля суперпарамагнитных частиц возьмём систему из N одинаковых частиц с одноосной анизотропией [M. Knobel et al., 2008]. В отсутствие внешнего поля энергия анизотропии одноосной частицы (Рисунок 1.1 а) равна:

$$E = KV\sin^2(\theta), \quad (1.3)$$

где K – константа анизотропии и V – объём частицы, θ – угол между направлением намагниченности частицы и осью её лёгкого намагничивания. Энергия частиц с направлением намагниченности вниз и вверх вдоль оси лёгкого намагничивания одинакова, поэтому при термодинамическом равновесии два уровня минимума энергии заселены одинаково.

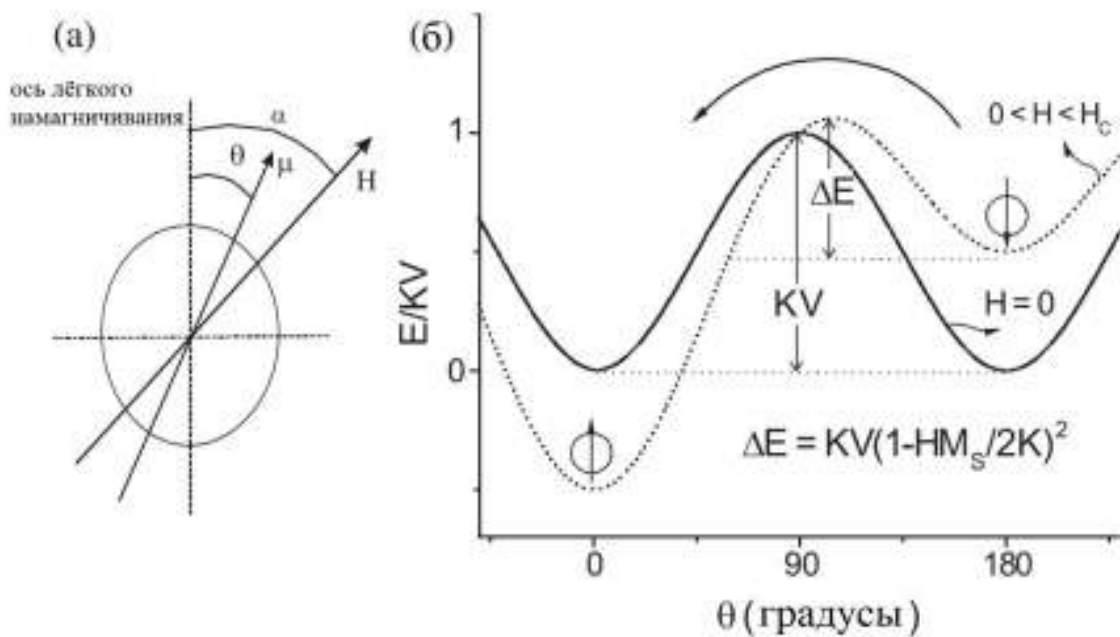


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение оси анизотропии магнитной нано частицы, угла направления внешнего магнитного поля α и угла намагничивания θ (а). Зависимость энергетического барьера частицы от угла θ при нулевом внешнем поле (сплошная линия) и при внешнем поле меньше критического (пунктирная линия) (б). [M. Knobel et al., 2008]

Представим, что в заданный момент времени t P частиц имеют магнитный момент, направленный вверх, и $N - P$ частиц – вниз. Через время dt , число частиц с направлением намагниченности вверх изменится на:

$$dP = \frac{(N-P)}{2\tau} dt - \frac{P}{2\tau} dt, \quad (1.4)$$

где $1/2\tau$ – вероятность обращения направления намагниченности в единицу времени. Из уравнения 1.4 намагниченность частиц можно записать как:

$$J = J_{nr} S_0 \exp(-t/\tau), \quad (1.5)$$

где S_0 – начальное значение $2P/N - 1$.

Если рассматривать совокупность частиц во внешнем поле, то энергия анизотропии записывается как:

$$E = KV \sin^2(\theta) - H J_{nr} V \cos(\alpha - \theta), \quad (1.6)$$

где α – угол между направлением лёгкой намагниченности частицы и направлением внешнего магнитного поля. Теперь два значения энергетического минимума не равны (Рисунок 1.1 б) и две вероятности обращения направления намагниченности в единицу времени можно определить как: $1/\tau^+$ для перехода с нижнего минимума на верхний и $1/\tau^-$ для обратной ситуации.

Во внешнем поле уравнение 1.4 принимает вид:

$$dP = \frac{(N-P)}{\tau^-} dt - \frac{P}{\tau^+} dt, \quad (1.7)$$

а намагниченность изменяется по закону:

$$J = J_{nr} [S_1 + (S_0 - S_1) \exp(-t/\tau)], \quad (1.8)$$

где

$$S_1 = \frac{\tau^+ - \tau^-}{\tau^+ + \tau^-}, \quad (1.9)$$

и

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau^+} + \frac{1}{\tau^-}. \quad (1.10)$$

Термодинамическое равновесие наступает при $t \gg \tau$ или $S_0 = S_1$. Теперь намагниченность ансамбля частиц не равна нулю. В среднем, часть частиц S_1 блокирована в области минимума (Рисунок 1.1 б), остальная часть

$1 - S_1$ релаксирует с характерным временем релаксации τ (1.10). Отметим, что если $H = 0$, то $\tau^+ = \tau^- = 2\tau$, и уравнение (1.7) переходит в (1.4), так же как (1.8) в (1.5).

Приведённые выше выкладки справедливы для ансамбля частиц одного размера. Однако геологические среды содержат частицы разных размеров. От распределения размеров частиц зависит поведение намагниченности. Релаксацию намагниченности ансамбля частиц с распределением по объёмам $P(V)$ можно записать как [Wang et al., 2010]:

$$J(t) = \frac{\int_0^\infty J_0 \exp[-t/\tau(V)] V P(V) dV}{\int_0^\infty V P(V) dV}, \quad (1.11)$$

где J_0 – начальная намагниченность ансамбля частиц, V – объём частицы.

В каждом конкретном случае определение распределения размера частиц и его параметров представляется непростой задачей.

Из-за сложности определения распределения частиц особое значение имеет функция Фрёхила [Трухин, 1973; Das, 2006; Fannin, Charles, 1995; Lee, 1984 a, b]. Предполагается, что неизвестная плотность распределения $P(\tau)$ времён релаксации магнитных частиц имеет куполообразную форму на логарифмической оси $\ln(\tau)$. Для простоты описания куполообразное распределение заменяют прямоугольным (Рисунок 1.2). Плотность распределения функции Фрёхила равна $P(\ln(\tau)) = \ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)$ внутри интервала $\tau_1 < \tau < \tau_2$ и равна нулю вне этого интервала. Считается, что измерения намагниченности выполняются во временном интервале $\tau_1 \ll t \ll \tau_2$ [Трухин, 1973]. Расчёты намагниченности для такого приближения дают:

$$J(t) \approx \text{const} - \frac{1}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \ln(t), \quad (1.12)$$

Подобное приближение позволяет на количественной основе выражать и сравнивать эффекты магнитной вязкости, используя небольшой объём экспериментальных данных (например, измерение магнитной восприимчивости на двух-трёх частотах переменного магнитного поля).

Согласно данным электронной микроскопии распределение частиц часто описывается логнормальным распределением [Knobel et al., 2008]:

$$P(V, V_m, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma V} \exp \left[-\frac{(\ln V - \ln V_m)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (1.13)$$

где V_m – средний объем частиц, σ – среднеквадратичное отклонение логарифмов объемов. Интеграл (1.11) для намагниченности при таком распределении уже не выражается аналитически и его вычисляют численно.

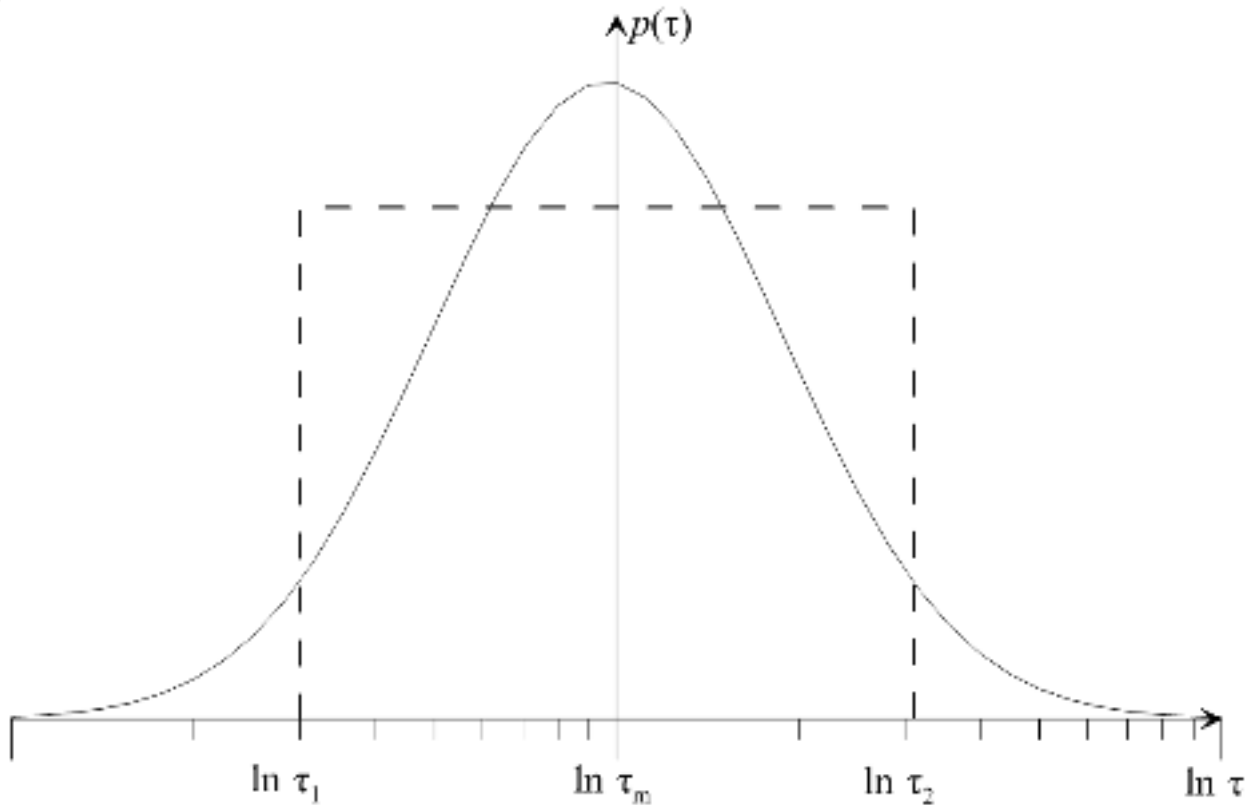


Рисунок 1.2 – Логнормальное распределение (сплошная линия) и распределение Фрелиха (пунктирная линия).

Модель поведения мелких магнитных частиц, описанная выше, широко используется при анализе данных магнитной гранулометрии. Однако она игнорирует эффекты взаимодействия между наночастицами. В геологических средах естественного происхождения концентрация мелких магнитных частиц мала и взаимодействием между ними можно пренебречь [Knobel et al., 2008]. Тем не менее, если концентрация магнитных частиц высока, то их взаимодействие начинает влиять на макроскопические магнитные свойства.

Подобные обстоятельства усложняют модель поведения намагниченности и в рамках данной диссертации не рассматриваются.

1.3 Методы исследования магнитной вязкости

Существует множество методов для обнаружения, оценки содержания и исследования распределения частиц по их размерам (магнитная гранулометрия). Одни методы основаны на нагревании или охлаждении магнитных образцов в присутствии (field-cooling «FC») или отсутствии (zero-field-cooling «ZFC») внешнего магнитного поля [Hunt et al., 1995]. Другие – основаны на измерении магнитных параметров при различных характерных временах, например, измерении магнитной восприимчивости на различных частотах намагничивающего переменного поля. Существуют методы, использующие гистерезисные параметры (например, коэрцитивную силу) [Enkin, 2007]. Ниже представлен краткий обзор наиболее распространённых методов исследования ультрадисперсных магнитных частиц.

1.3.1 Температурные методы ZFC и FC

Как ясно из названия, методы основаны на охлаждении образцов в присутствии или отсутствии внешнего магнитного поля, это показывает среднюю блокирующую температуру и даёт информацию о распределении размеров частиц [Dorman, 1997]. На рисунке 1.3 изображены типичные кривые ZFC-FC эксперимента на образце Co-Ni-B частиц, рассеянных в полимере. На рисунке указаны средняя блокирующая температура (T_B) и температура необратимости (T_{irr}). Так же приведена кривая $d(M_{FC} - M_{ZFC})/dT$, её форма даёт информацию о распределении энергетических барьеров частиц, которая пропорциональна распределению объёмов частиц (объёмная анизотропия).

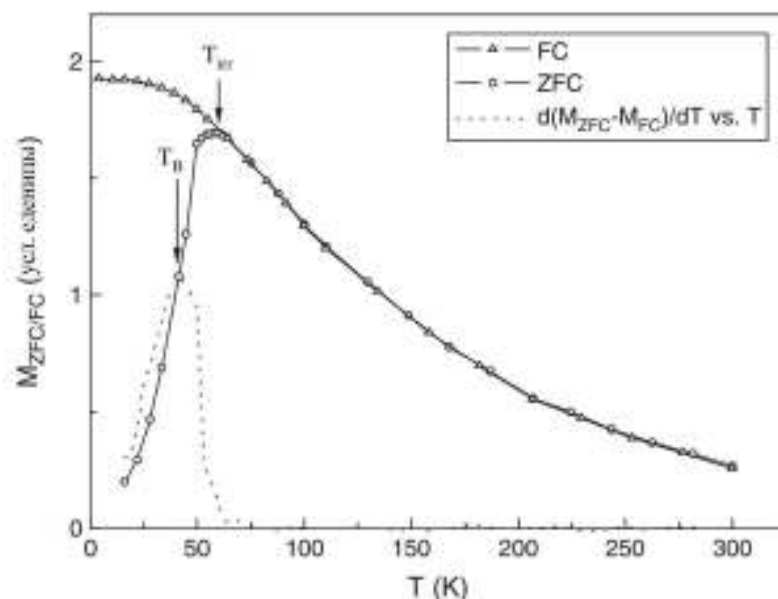


Рисунок 1.3 – Типичные результаты измерений ZFC-FC на образце Co-Ni-B частиц рассеянных в полимере. На рисунке указаны средняя блокирующая температура (T_B) и температура необратимости (T_{irr}).

1.3.2. Методы исследований во временной области

Этот тип экспериментов используется для исследования релаксации намагниченности системы наночастиц при различных температурах. Измерения могут выполняться двумя способами. Первый способ состоит в охлаждении образца в нулевом внешнем поле (ZFC) до нужной температуры, затем прикладывается внешнее поле и исследуется изменение намагниченности во времени. Характерное время изменения намагниченности каждой частицы зависит от величины его энергетического барьера, таким образом полная характеристика намагниченности является функцией, зависящей от распределения размеров частиц. Второй способ состоит в охлаждении образца во внешнем поле (метод FC). После выключения внешнего поля записывается релаксация намагниченности. В отличие от первого способа, энергетические барьеры частиц не искажаются внешним магнитным полем, таким образом удаётся получить неискажённую информацию о наночастицах [M. Knobel et al. 2008]. Типичные времена τ_m подобных экспериментов – от 0.1 с до 100 с и более.

Согласно [Dunlop, 1983] процесс релаксации намагниченности, построенный в логарифмическом масштабе, можно аппроксимировать прямой линией и описывать коэффициентом вязкости $S = dJ/d \log(t)$. Предполагается, что коэффициент вязкости отражает количественное содержание суперпарамагнитных частиц в образце [Tauche, 2006].

Методы исследования магнитной вязкости во временной области просты в реализации и не требуют дорогостоящего оборудования.

1.3.3 Частотные методы исследования

Публикации по изучению магнитной вязкости во частотной области встречаются чаще, чем по исследованиям во временной области. Частотные методы измерений магнитной вязкости охватывают широкий частотный диапазон, который можно условно разделить по характерным временам эксперимента τ_m [J.L. Dorman, 1997]:

- $\tau_m = 10^2 - 10^4$ с – для экспериментов на очень низких частотах.
- $\tau_m = 10^{-5} - 10^{-1}$ с – классические времена эксперимента.
- $\tau_m = 10^{-8} - 10^{-5}$ с – эксперименты на очень высоких частотах до сих пор очень сложны в реализации.

Из перечисленных временных диапазонов в петрофизике (в частности, для палеомагнитных исследований) чаще всего работают в классическом. Магнитную восприимчивость измеряют на нескольких частотах переменного намагничивающего поля. Параметры вязкости оцениваются из различия этих двух значений. Используя значения модуля магнитной восприимчивости κ_{lf} и κ_{hf} , измеренные, соответственно, на низкой и высокой частотах, находят частотно-зависимую магнитную восприимчивость, определяемую как разность $\Delta\kappa = \kappa_{lf} - \kappa_{hf}$. Данный параметр пропорционален содержанию СПМ зерен. Относительный вклад (в процентах), который суперпарамагнитные зерна вносят в магнитную восприимчивость, оценивают с помощью FD-фактора, вычисляемого по формуле [Dearing, 1994]:

$$FD = 100 \cdot (\kappa_{lf} - \kappa_{hf}) / \kappa_{lf}.$$

Более подробно об исследовании магнитной вязкости в частотной области описано в главе 2.

1.3.4 Мёссбауэровская спектроскопия

Мёссбауэровская спектроскопия – это технология, основанная на эмиссии и резонансном поглощении без отдачи γ квантов в диапазоне энергий 10-100 кэВ. Точное определение энергии гамма квантов делает возможным изучение статического и динамического сверхтонкого расщепления. Это позволяет подробно исследовать химические, структурные и магнитные свойства частиц. Мёссбауэровская спектроскопия подходит для изучения свойств ультрадисперсных магнитных частиц [Morup, 1980; Topsoe, 1980]. Изотоп ^{57}Fe является наиболее простым для получения, применимым в спектроскопии, и поэтому наиболее часто используемым. К счастью, железо присутствует в большинстве важных магнитных материалов.

Мёссбауэровская спектроскопия исследует флуктуации магнитного момента частицы посредством измерения флуктуаций в магнитном сверхтонком взаимодействии. Такая методика обладает некоторыми отличительными преимуществами перед другими методами. Во-первых, исследования проводятся на малом количестве образца. Результатом исследований является спектр энергий поглощения, выявляющий отдельные группы частиц, а не скалярная величина, полученная осреднением по всему присутствующему ансамблю. Во-вторых, измерения могут выполняться в отсутствии внешнего магнитного поля. В третьих, характерное время эксперимента порядка $\tau_m = 10^{-8}$ (для ^{57}Fe) является промежуточным между классическими частотными экспериментами ($\tau_m \approx 10^{-5}$) и экспериментами с нейтронным рассеиванием ($\tau_m \approx 10^{-10}$) [J.L. Dorman, 1997].

1.4 Проявления магнитной вязкости в геофизическом методе переходных процессов

Чаще всего при проведении геофизических измерений методом переходных процессов эффекты магнитной вязкости слабо проявлены по сравнению с вкладом вихревых токов. Однако существуют природные и антропогенные геологические среды и объекты, в присутствии которых вклад магнитной вязкости в ЭДС переходного процесса заметен или даже является преобладающим. Влияние магнитной вязкости проявляется в виде ЭДС, убывающей во времени приблизительно как $1/t$ (Рисунок 1.4). При исследовании таких объектов методами импульсной индуктивной электроразведки эффекты магнитной вязкости невозможно игнорировать.

Обычно в методе переходных процессов проявления магнитной вязкости рассматривают как помеху, затрудняющую интерпретацию индукционных переходных характеристик в терминах «нормальной» электропроводности [Захаркин и др., 1988; Захаркин, Бубнов, 1995; Buselli, 1982; Dabas, Skinner, 1993; Lee, 1984a, b; Pasion et al., 2002]. Известно, что формальная интерпретация медленно убывающей ЭДС приводит к появлению не существующих в реальности слоев очень низкого удельного сопротивления [The geophysics of ..., 1980; Buselli, 1982].

Вместе с тем в ряде публикаций приводятся результаты, свидетельствующие о том, что проявления магнитной вязкости, измеренные с помощью метода переходных процессов в условиях естественного залегания, отражают особенности генезиса и состава природных и антропогенных геологических сред и объектов, а также происходивших в приповерхностных слоях геологических процессов [Барсуков, Файнберг, 2002; Кожевников и др., 1998; Кожевников, Никифоров, 1999; Кожевников, Снопков, 1990, 1995; Barsukov, Fainberg, 2001; Kozhevnikov et al., 2001; Kozhevnikov, Nikiforov, 1995; Thiesson et al., 2007]. Эти результаты инициировали модельные расчеты с целью выработки рекомендаций относительно того, каким образом в

процессе полевых съемок МПП можно усилить или, наоборот, ослабить влияние магнитной вязкости [Кожевников, Антонов, 2008, 2009, 2011].

Недавно показано, что при соответствующей методике полевых наблюдений появляется возможность инверсии переходных характеристик, измеренных в районах с проявлениями магнитной вязкости в рамках модели горизонтально-слоистой среды, магнитная проницаемость которой зависит от времени / частоты [Стогний и др., 2010; Kozhevnikov N.O., Antonov E.Y., 2012; Кожевников и др., 2012]. Эти результаты показывают, что метод переходных процессов в принципе позволяет изучать объемное распределение параметров, характеризующих магнитную вязкость в *массиве* горных пород. Очевидно, лабораторные измерения индукционных импульсных характеристик образцов, содержащих ультрадисперсные зерна ферромагнитных минералов, необходимы в качестве основы для интерпретации данных импульсной индуктивной электроразведки, а также проектирования полевых работ в районах с проявлениями магнитной вязкости.

Развитие в последние десятилетия электроразведочной аппаратуры методом МПП сделало её удобной для измерения импульсных характеристик намагниченности. Нижняя граница диапазона временных задержек такой аппаратуры составляет единицы-десятки мкс, верхняя – от десятков до сотен мс [Секачов и др., 2006]. Это позволяет изучать релаксацию намагниченности в диапазоне ранних времен, недоступных при ZFC-FC исследованиях. Очевидно, стабильные однодоменные частицы, характеризующиеся очень большими временами релаксации, не оказывают влияния на импульсную характеристику намагниченности. С другой стороны, многодоменные зерна, а тем более зерна парамагнитных минералов вследствие малых времен релаксации также «невидимы» для импульсных индукционных систем. Следовательно, эти системы реагируют на суперпарамагнитные частицы с $\tau \leq 0.1 - 1$ с. Таким образом, лабораторные измерения импульсной характеристики

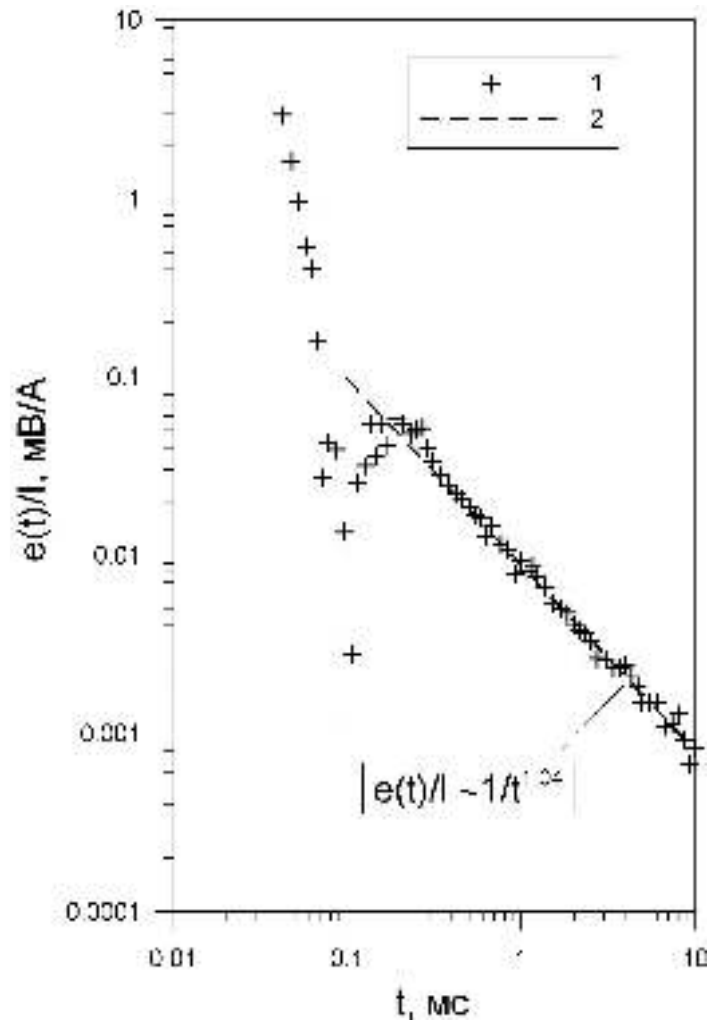


Рисунок 1.4 – Индукционная импульсная характеристика туфогенных образований, измеренная В.А. Ванчуговым в районе озера Сиеллях в Якутии совмещенной установкой размером 25м x 25м: 1 – экспериментальные данные; 2 – степенная зависимость, аппроксимирующая ЭДС переходного процесса на поздних временах [Стогний и др., 2010].

намагниченности с помощью индукционных систем дополняют имеющийся набор петромагнитных методов, используемых в магнитной гранулометрии.

Однако лабораторные измерения импульсных характеристик намагниченности представляют интерес не только в связи с петромагнитными исследованиями как таковыми. Они могут оказаться востребованными при интерпретации результатов индуктивной электроразведки, в первую очередь, методом переходных процессов (МПП) и его аналога – зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ).

1.5 Выводы

Из вышесказанного можно заключить, что магнитная вязкость является важным магнитным свойством, исследованием которого занимаются во многих областях науки и техники. Для его изучения используются различные методы и технологии, начиная от исследования релаксации намагниченности от времени, заканчивая исследованиями квантовых эффектов сверхтонкого расщепления. Однако проявление магнитной вязкости при разведке методом переходных процессов явление относительно новое и из-за малой изученности считается негативным фактором, мешающим при проведении работ. Тем не менее, импульсные характеристики намагниченности, получаемые методами МПП на местах с высоким содержанием суперпарамагнитных частиц несут в себе информацию об этих частицах, которая может быть использована при интерпретации. Более того, по мнению автора, используемая аппаратура и методика проведения работ обладает рядом преимуществ перед методиками исследования магнитной вязкости в частотной области. Таким образом, лабораторная установка на базе полевой станции может стать дополнительным инструментом для исследования магнитной вязкости как в полевых, так и в лабораторных условиях.

Глава 2

РЕФЕРЕНТНАЯ БАЗА ДАННЫХ О ПРОЯВЛЕНИЯХ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Как уже отмечалось, основная цель настоящей диссертационной работы заключается в ответе на вопрос: можно ли лабораторные измерения импульсных характеристик намагниченности образцов использовать для изучения магнитной вязкости, в частности, оценки содержания и распределения размеров ультрадисперсных [суперпарамагнитных] магнитных зерен.

Очевидно, ответ на этот вопрос в числе прочего предполагает сравнение параметров (характеристик) магнитной вязкости, определенных по импульсным характеристикам намагниченности образцов, с параметрами, найденными другим, известным способом.

Поэтому первоочередная задача при работе над диссертацией заключалась в создании референтной базы (представительного набора) результатов измерений параметров магнитной вязкости с помощью одного из известных методов. Для решения этой задачи следовало определиться с методом и сформировать представительную, или «эталонную», коллекцию образцов.

Для сравнения был выбран метод основанный на измерении магнитной восприимчивости на нескольких частотах. Благодаря тому, что этот метод является достаточно информативным [J.L. Dorman, 1997], производительным [Dearing, 1994] и сравнительно дешевым, он нашел широкое применение при изучении магнетизма природных и антропогенных геологических сред.

2.1 Описание измерений в частотной области. Основные понятия, определения, параметры

В общем случае магнитная восприимчивость геологических сред может быть представлена в виде двух слагаемых [Worm, 1999]:

$$\kappa^*(\omega) = \kappa_1 + \kappa_2^*(\omega). \quad (2.1)$$

В этом выражении κ_1 не зависит от частоты и является действительной величиной. Очевидно, κ_1 интерпретируется как коэффициент пропорциональности κ_i между приложенным магнитным полем H и индуцированной намагниченностью J_i : $\kappa_1 = \kappa_i = J_i/H$ [Clark, 1997; Encyclopedia, 2007]. Второе слагаемое, $\kappa_2^*(\omega)$, является комплексным и частотно зависимым. Эта составляющая восприимчивости описывает эффекты магнитной вязкости.

При интерпретации измерений частотно-зависимой магнитной восприимчивости часто используют модель ансамбля однодоменных частиц. Напомним, что время релаксации намагниченности однодоменной частицы определяется выражением (1.1):

$$\tau = \tau_0 \exp(KV/kT),$$

где K – постоянная магнитной анизотропии, V – объем частицы, T – температура, k – постоянная Больцмана, $\tau_0 = 10^{-9}$ с. Частотно-зависимая комплексная магнитная восприимчивость такой частицы определяется выражением [Worm, 1998, 1999 a, b; Worm et al., 1993; The Geophysics ..., 1980]

$$\kappa^*(\omega) = \kappa_0 \frac{1 - j\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2},$$

где $j = \sqrt{-1}$, ω – круговая частота κ_0 – статическая (при $\omega=0$) магнитная восприимчивость частицы.

В геологических средах присутствуют частицы разного размера, поэтому их магнитные свойства характеризуются спектром времен релаксации, определяемым весовой функцией $p(\tau)$, которую называют также

функцией распределения. При исследовании магнитной вязкости в частотной области часто используют приближение функции распределения функцией Фрёлиха, которая описывает распределение времен релаксации ансамбля однодоменных частиц, у которых энергетические барьеры между соседними состояниями намагниченности распределены равномерно (см. главу 1).

В частотной области магнитная восприимчивость ансамбля однодоменных частиц, распределение времен релаксации которых описывается функцией Фрёлиха, определяется формулой [Трухин, 1973; Das, 2006; Fannin, Charles, 1995; Lee, 1984 a, b]

$$\kappa_2^*(\omega) = (\kappa_s - \kappa_\infty) \left[1 - \frac{1}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \cdot \ln \frac{(1 + j\omega\tau_2)}{(1 + j\omega\tau_1)} \right] \quad (2.3)$$

здесь κ_s – восприимчивость, измеренная на частоте $\omega \ll 1/\tau_1$, κ_∞ – на частоте $\omega \gg 1/\tau_2$.

Поставив (2.3) в (2.1), получаем выражение для магнитной восприимчивости с учетом индуцированной и вязкой намагниченности

$$\kappa^*(\omega) = \kappa_i + (\kappa_s - \kappa_\infty) \left[1 - \frac{1}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \cdot \ln \frac{(1 + j\omega\tau_2)}{(1 + j\omega\tau_1)} \right] \quad (2.4)$$

Рисунок 2.1 иллюстрирует общие закономерности поведения магнитной восприимчивости в зависимости от частоты. На рисунке представлены графики реальной и мнимой составляющей, а также модуля магнитной восприимчивости, рассчитанной по формуле (2.4) для среды с параметрами: $\kappa_i = 0.01$ ед. СИ, $\kappa_s - \kappa_\infty = 0.01$ ед. СИ, $\tau_1 = 10^{-6}$ с, $\tau_2 = 1$ с.

На низких частотах $\kappa^*(\omega)$ приближается к статическому значению $\kappa(0) = \kappa_i + (\kappa_s - \kappa_\infty)$, а на высоких – к κ_i . В диапазоне частот $1/\tau_2 < \omega < 1/\tau_1$ реальная компонента $\kappa^*(\omega)$ убывает пропорционально логарифму частоты, тогда как мнимая не зависит от частоты [Fannin, Charles, 1995].

Просмотр литературы, где приводятся результаты измерения комплексной магнитной восприимчивости показывает, что обычно величина

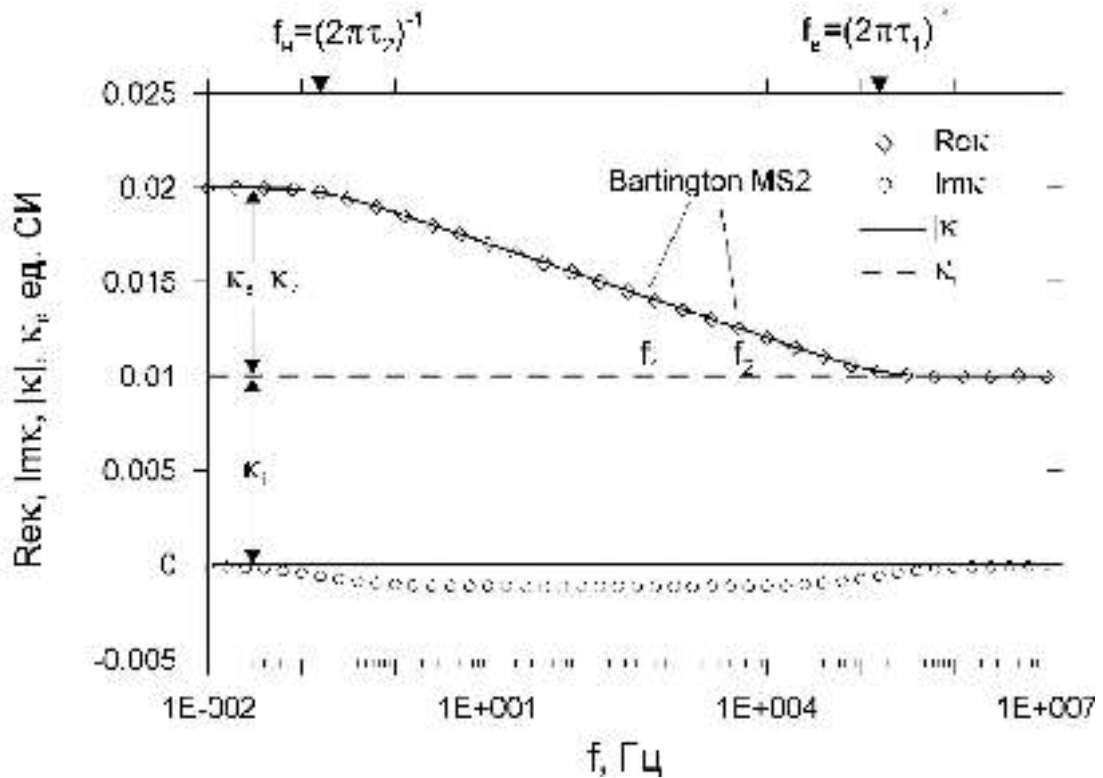


Рисунок 2.1 – Графики реальной и мнимой составляющей, а также модуля магнитной восприимчивости, рассчитанные по формуле (3) для среды с параметрами: $\kappa_i = 0.01$ ед. СИ, $\kappa_s - \kappa_\infty = 0.01$ ед. СИ, $\tau_1 = 10^{-6}$ с, $\tau_2 = 1$ с.

мнимой составляющей восприимчивости намного меньше по сравнению с реальной, поэтому $\text{Re}[\kappa^*(\omega)] \approx |\kappa^*(\omega)|$.

Обычно частоты, на которых измеряют магнитную восприимчивость, удовлетворяют неравенствам: $1/\tau_2 \ll \omega \ll 1/\tau_1$. В этом случае [Das, 2006; Pasion et al., 2002; Mullins and Tite, 1973]

$$\frac{\partial \text{Re}(\kappa)}{\partial \ln \omega} = \frac{2}{\pi} \text{Im}(\kappa) = -\frac{\kappa_s - \kappa_\infty}{\ln(\tau_2 / \tau_1)}. \quad (2.5)$$

Согласно этому выражению, определив угол наклона графика, на котором по оси ординат отложена реальная компонента магнитной восприимчивости, а по оси абсцисс – логарифм частоты, можно найти квадратурную компоненту магнитной восприимчивости, а также параметр $(\kappa_s - \kappa_\infty) \cdot \ln(\tau_1 / \tau_2)$.

Обычно наклон графика определяют по двум точкам. Так, мост Bartington MS2 измеряет модуль магнитной восприимчивости на двух

частотах [Dearing, 1994]. Поскольку $\text{Re}[\kappa^*(\omega)] \approx |\kappa^*(\omega)|$, при определении наклона графика вместо реальной компоненты используют значения модуля магнитной восприимчивости κ_{lf} и κ_{hf} , измеренные, соответственно, на низкой и высокой частотах.

Очевидно, в этом случае

$$\frac{\partial \text{Re}(\kappa)}{\partial \ln \omega} \approx \frac{\kappa_{lf} - \kappa_{hf}}{\ln f_2 - \ln f_1},$$

откуда с учетом (2.5) следует, что

$$\kappa_s - \kappa_\infty \approx -\frac{\kappa_{lf} - \kappa_{hf}}{\ln f_2 - \ln f_1} \cdot \ln(\tau_2 / \tau_1).$$

Последняя формула дает возможность, задавшись отношением τ_2/τ_1 , оценить разность между статической и динамической восприимчивостями ($\kappa_s - \kappa_\infty$). Этот параметр позволяет на количественной основе выражать и сравнивать эффекты магнитной вязкости. Если проявления магнитной вязкости связаны с приобретением и/или релаксацией намагниченности ансамблем суперпарамагнитных частиц, логично предположить, что разность ($\kappa_s - \kappa_\infty$) пропорциональна их содержанию. Если же ($\kappa_s - \kappa_\infty$) известна, например, по данным независимых измерений, можно оценить отношение τ_2/τ_1 , характеризующее ширину спектра времен релаксации ансамбля суперпарамагнитных частиц.

Относительный вклад (в процентах), который в магнитную восприимчивость вносят суперпарамагнитные зерна, оценивают с помощью FD-фактора, вычисляемого по формуле [Dearing, 1994]:

$$\text{FD} = 100 \cdot (\kappa_{lf} - \kappa_{hf}) / \kappa_{lf}.$$

2.2 Аппаратура для исследования магнитной вязкости в частотной области

Одним из распространенных приборов для изучения проявлений суперпарамагнетизма горных пород в частотной области является мост

Bartington 2S. Результаты, полученные с помощью этого прибора, представлены во множестве публикаций. В числе достоинств моста Bartington MS2 – простота работы, высокая производительность, малый объем образца.

Мост Bartington MS2 включает в себя портативный измеритель и разнообразные сенсоры. Каждый сенсор спроектирован для специальных задач с учётом типов образцов. Сенсоры основаны на колебательном контуре, в котором обмотка индуктивности, в которую помещается образец, определяет частоту колебаний. Измеренная с высокой точностью частота колебаний в цифровом виде передаётся на измеритель, где она пересчитывается в магнитную восприимчивость.

Диапазон измерений объёмной восприимчивости измерителя составляет $1-9999 \cdot 10^{-5}$ СИ с разрешением $0.2 \cdot 10^{-6}$ СИ (разрешение зависит от температурного дрейфа и внешних шумов). Для исследования магнитной вязкости используется сенсор MS2B, способный измерять магнитную восприимчивость на двух частотах – низкой $f=465$ Гц и высокой $hf = 4650$ Гц. Точность калибровки сенсора составляет 1%, а точность HF/LF кросс-калибровки составляет 0.1%. Температурно-временной дрейф равен $\pm 0.05 \cdot 10^{-5}$ СИ/°C/минуту. Для уменьшения влияния дрейфа на результаты исследований в методике измерений предусмотрено измерение пустого держателя перед каждым измерением образца, чтобы учесть смещение нуля.

Другим прибором для измерения магнитной восприимчивости, появившимся относительно недавно, является мост AGICO Kappabridge MFK1. Сами разработчики охарактеризовывают его как «возможно самый чувствительный коммерчески доступный прибор для измерения магнитной восприимчивости и анизотропии магнитной восприимчивости».

Kappabridge MFK1 состоит из сенсора с автоматизированной системой держателя образца, блока управления и компьютера. Принцип действия прибора основан на автоматическом индукционном компенсационном мосте. MFK1 оборудован автоматической системой выставления нуля и автоматической системой компенсации температурного дрейфа.

Каррабридж способен измерять магнитную восприимчивость на трёх частотах: $F_1 = 976$ Гц, $F_2 = 3904$ Гц, $F_3 = 15616$ Гц. Соответствующие им диапазон измерений: от 0 до 0.9 СИ (F_1), от 0 до 0.3 СИ (F_2), от 0 до 0.7 СИ (F_3); и точность измерений: $2 \cdot 10^{-8}$ СИ (F_1), $6 \cdot 10^{-8}$ СИ (F_2), $12 \cdot 10^{-8}$ СИ (F_3). Производителем указано, что точность абсолютной калибровки составляет 3%, а погрешность измерений на различных частотах составляет 0.3%.

2.2 Образцы для исследования магнитной вязкости

2.2.1 Витимские базальты (1)

Образцы были выпилены из керна скважин, пробуренных в базальтах Амалатского плато (Витимский урановорудный район, республика Бурятия), перекрывающих гидрогенные месторождения урана в неогеновых палеодолинах. Здесь при съемках методом переходных процессов отмечены значительные проявления магнитной вязкости [Антонов и др., 2011; Кожевников и др., 2012]. Имеется детальная характеристика петромагнитных параметров образцов [Казанский и др., 2012]. Образцы представлены керном из двух скважин – 4999 с глубиной 180 м и 5112 с глубиной 140 м.

2.2.2 Витимские базальты (2)

Образцы базальтов Витимского плато, отобранных на обнажениях по берегу реки Джилинда 75 км севернее села Романовка республики Бурятия. Координаты $53^\circ 54'$ сш $113^\circ 20'$ вд.

2.2.3 Образцы горна

Кубические образцы, выпиленные из внутренней поверхности одного из горнов, найденных при археологических раскопках в Приольхонье. Горн использовался древними людьми для получения железа сыродутным

способом, его внутренняя поверхность обладает значительной магнитной вязкостью. Примечательно, что именно присутствие суперпарамагнитных частиц в верхнем слое почвы послужило причиной открытия памятника древней металлургии железа в этом регионе [Kozhevnikov et al., 2001]. В работе [Kozhevnikov et al., 2003] представлены результаты детального изучения магнетизма и вещественного состава древних металлургических шлаков, отобранных при раскопках этого памятника, однако магнитные свойства самих горнов ранее не изучались.

2.2.4 Магнитная фракция из отвалов археологического раскопа

Магнитная фракция отобрана с помощью постоянного магнита из отвалов археологического раскопа в пади Барун-Хал (Приольхонье, Западное Прибайкалье). Раскопки проводились с целью изучения памятника древней металлургии железа, обнаруженного здесь в 1997 г. [Кожевников и др., 1998; Kozhevnikov et al., 2001]. Отвалы представлены верхними – до глубины 20 – 50 см – слоями почвы, фрагментами металлургических печей, шлаками. Вследствие высокого содержания суперпарамагнитных частиц перечисленные компоненты характеризуются значительными проявлениями магнитной вязкости [Кожевников и др., 2008; Kozhevnikov et al., 2003].

2.2.5 Образцы туфов

Представлены керном скважины, пробуренной на одном из участков в междуречье реки Ирелях и ручья Чуоналыр Мало-Ботуобинского алмазоносного района в 30 км к западу от г. Мирный [Стогний и др., 2010]. Проявления магнитной вязкости связаны с разнообломочными туфами основного состава, которые вскрываются в тектонических блоках и между sillами долеритов. Подчиненное значение имеют линзы туфогенно-осадочных пород: туффиты, туфопесчаники, туфоалевролиты,

туфоаргиллиты. При выбросе туфового материала в атмосферу во время вулканических извержений происходило его быстрое остывание, поэтому кристаллизация частиц ферромагнитных минералов заканчивалась, когда их размеры были настолько малы, что многие из этих частиц являются суперпарамагнитными [Worm, 1999]. Предоставлены Вас. В. Стогнием.

2.2.6 Образцы африканского песка

Образец №1. Красноцветные латериты, перекрывающие месторождение хрома в Зимбабве. При поисках хромитового оруденения методом ЗСБ здесь были зарегистрированы аномально медленно убывающие переходные процессы [Zadorozhnaya et al., 2012]. Образец предоставлен В. Ю. Задорожной.

Образец №2. Предоставлен В.А. Ванчуговым. При проведении зондирований методом переходных процессов на северо-западе Республики Ангола с целью поиска структур, благоприятных для аккумуляции подземных вод, наблюдались сигналы (ЭДС в приемной петле), убывающие как $1/t$. Образец почвы из зумпфа гидрогеологической скважины с глубины около 1.5 м был отобран для того, чтобы выяснить возможную связь аномальных переходных процессов с влиянием магнитной вязкости. После полного высыхания, образец был растерт до мелкодисперсного песка красно-коричневого цвета.

2.2.7 Образцы кирпичей

Строительный кирпич красного цвета. Как известно [Kozhevnikov, Nikiforov, 1995; Кожевников, Никифоров, 1999], кирпичи и другие изделия из обожженной глины демонстрируют значительные проявления магнитной вязкости.

2.3 Результаты измерения магнитной вязкости образцов Витимских базальтов

В таблице 2.1 приведены результаты измерения магнитной восприимчивости образцов Витимских базальтов (1) прибором Bartington MS2. Измерения проводились по стандартной методике, описанной в [Dearing, 1994]. Перед измерениями была проведена проверка калибровки. Далее измерялась магнитная восприимчивость всех образцов на низкой, потом на высокой частоте.

Таблица 2.1 – Результаты измерения магнитной восприимчивости образцов Витимских базальтов (1) прибором Bartington MS2. Образцы со значительным проявлением магнитной вязкости выделены жёлтым цветом

№	K_{lf} , 10 ⁻⁵ СИ	K_{hf} , 10 ⁻⁵ СИ	$K_{lf} - K_{hf}$, 10 ⁻⁵ СИ	FD, %	№	K_{lf} , 10 ⁻⁵ СИ	K_{hf} , 10 ⁻⁵ СИ	$K_{lf} - K_{hf}$, 10 ⁻⁵ СИ	FD, %
4	1543.8	1537.7	6.1	0.4	5_2	2464.7	2431.9	32.8	1.33
4_2	1083.2	1076.4	6.8	0.63	5_3	1284.5	1279.1	5.4	0.42
4_3	1507.4	1494.9	12.5	0.83	5_4	789	778.1	10.9	1.38
4_5	3395.4	3365.3	30.2	0.89	5_5	1239.3	1235.2	4.1	0.33
4_6	4548	4449.5	98.6	2.17	5_6	609.6	593.6	16	2.63
4_7	2203.5	2178.1	25.4	1.15	5_7	380.7	375.1	5.5	1.25
4_8	426.1	414.1	12	2.8	5_8	349.7	348.4	1.3	0.37
4_9	100.1	98.8	1.3	1.25	5_9	607.2	605.6	1.6	0.26
4_10	89.3	88.8	0.5	0.64	5_10	170.4	169.9	0.5	0.27
5_1	2423.5	2303.8	119.7	4.94	5_11	988.6	944	44.5	4.5

Результаты измерения Витимских базальтов показали, что большинство образцов обладает FD фактором меньше 1%. Всего 5 образцов из 20 имеют FD>2%, и только 2 образца имеют FD>4%. В целом, по результатам измерений можно заключить, что базальты с Витимского плато обладают ощутимыми проявлениями магнитной вязкости, что позволяет выделить участки керна с повышенным содержанием суперпарамагнитных частиц.

Магнитная восприимчивость тех же образцов измерялась также на приборе Kappabridge MKF-1. Результаты приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерения магнитной восприимчивости образцов Витимских базальтов прибором Kappabridge MKF-1

№	$K_{f1},$ 10^{-5} СИ	$K_{f2},$ 10^{-5} СИ	$K_{f3},$ 10^{-5} СИ	FD ($f1-f2$), %	FD ($f2-f3$), %	FD ($f1-f3$), %	FB ($f1-f3$), %
4	1973.2	1924.4	1951.9	2.4	-1.4	1.08	0.9
4_2	1518.6	1511.6	1528	0.5	-1	-0.6	-0.5
4_3	1825.9	1776.2	1789.7	2.7	-0.7	1.9	1.6
4_5	4689.1	4603.4	4603.6	1.8	0	1.8	1.5
4_6	4892.1	4788.5	4754.3	2.1	0.7	2.8	2.3
4_7	3092.4	3029.6	3023.3	2.	0.2	2.2	1.8
4_8	676.1	653.2	646.4	3.4	1.05	4.4	3.6
4_9	142.03	138	138	2.8	0.01	2.8	2.3
4_10	83.3	82.3	82	1.1	0.3	1.4	1.2
5_1	3504.2	3434.1	3303.6	2	3.8	5.7	4.7
5_2	3033.8	2966.8	2967.8	2.2	0	2.1	1.8
5_3	1490.8	1451.9	1470.9	2.6	-1.3	1.3	1.1
5_4	1149.8	1117.4	1122.9	2.8	-0.5	2.3	1.9
5_5	1658.6	1616.7	1639.1	2.5	-1.3	1.1	0.9
5_6	727.6	698.8	691.4	3.9	1	4.9	4
5_7	481.2	466.6	470.3	3	-0.8	2.2	1.8
5_8	492.4	478.8	484.9	2.7	-1.2	1.5	1.2
5_9	382.4	371.6	377.2	2.8	-1.4	1.3	1.1
5_10	184.4	183.5	185.6	0.5	-1.1	-0.6	-0.5
5_11	1387.9	1338.9	1302.6	3.5	2.7	6.1	5.1

Из результатов видно, что некоторые значения FD получились отрицательными. Физически в этом нет никакого смысла, это результат погрешности измерений. Для некоторых образцов дрейф при измерении магнитной восприимчивости составил больше 1%, в то время как большинство образцов имеет $FD < 1\%$.

Согласно [Hrouda, 2011], результаты измерения, полученные с помощью прибора Kappabridge MKF-1, можно пересчитать с учётом различия частот для сравнения результатов с данными, полученными на приборе Bartington MS2.

$$FB(f_1 - f_3) = \frac{\ln 10}{\ln f_3 - \ln f_1} \cdot FD.$$

Факторы FB (Kappabridge) и FD (Bartington) образцов со значительными проявлениями магнитной вязкости отличаются не более чем 1%. Подобное отклонение параметров несколько превышает заявленную производителем погрешность измерений.

В таблице 2.3 представлены результаты измерений магнитной восприимчивости Витимских базальтов (2) на мосте Bartington MS2.

Таблица 2.3 – Результаты измерения магнитной восприимчивости образцов Витимских базальтов (2) прибором Bartington MS2

№	κ_{lf} , 10^{-5} СИ	κ_{hf} , 10^{-5} СИ	$\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$, 10^{-5} СИ	FD, %	№	κ_{lf} , 10^{-5} СИ	κ_{hf} , 10^{-5} СИ	$\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$, 10^{-5} СИ	FD, %
63	2904.2	2777.5	126.7	4.3	4	1744	1677.8	66.2	3.7
11	3441.3	3323.3	118	3.4	12	1625	1558.8	66.2	4
15	1780.2	1691.3	88.9	4.9	25	1750.3	1685.2	65.1	3.7
39	1875.2	1789.4	85.8	4.5	55	1406.1	1343.4	62.7	4.4
39b	1897.8	1813.7	84.1	4.4	20	1685.7	1624.2	61.5	3.6
8	1804.2	1720.8	83.4	4.6	38	1363.8	1302.9	60.9	4.4
18	2098.8	2021.3	77.5	3.6	50	1132.7	1082.6	50.1	4.4
42	1760.7	1685.5	75.2	4.2	2	1167.3	1119.8	47.5	4
5	1663	1589.1	73.9	4.4	16	939.4	893.9	45.5	4.8
14	1717.8	1645.7	72.1	4.1	35	733.7	701	32.7	4.4
36	1616.3	1546	70.3	4.3	58	517.1	495.5	21.6	4.1
40	1516.9	1449.1	67.8	4.4					

Результаты измерения этих образцов лежат в узком диапазоне по FD. Полученные значения $\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$ лежат в диапазоне $20-120 \cdot 10^{-5}$ СИ.

При анализе данных возникает вопрос о погрешности измерений. Необходимо понимать, какие образцы мы можем различить, а какие нет. Вопрос о погрешностях измерений напрашивался сам собой уже при

исследовании образцов керна. Во время измерений наблюдался дрейф нуля, а данные, полученные на разных приборах, отличались более чем на описанную в мануалах погрешность.

2.4 Экспериментальная оценка погрешности измерений магнитной вязкости в частотной области

Для оценки погрешности измерений магнитной вязкости на приборе Bartington MS2 один образец измеряли по три раза в день три дня подряд. Результаты измерений представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты измерения магнитной восприимчивости образца Витимских базальтов прибором Bartington MS2 в течение 3 дней

№	κ_{lf} , 10^{-5} СИ	κ_{hf} , 10^{-5} СИ	$\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$, 10^{-5} СИ	FD, %	№	κ_{lf} , 10^{-5} СИ	κ_{hf} , 10^{-5} СИ	$\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$, 10^{-5} СИ	FD, %
1 день					2 день				
2(1)	1218.8	1161.6	57.2	4.6	2(1)	1210.9	1155.3	55.6	4.5
2(2)	1212.7	1159.8	52.9	4.3	2(2)	1206.9	1155.5	51.4	4.2
2(3)	1212.8	1152.6	60.2	4.9	2(3)	1209.1	1152.5	56.6	4.6
3 день									
2(1)	1201.9	1150.6	51.3	4.2					
2(2)	1203.6	1149.8	53.8	4.4					
2(3)	1203.9	1151.5	52.4	4.3					

По результатам многократных измерений было вычислено среднеквадратичное отклонение, и определены доверительные интервалы с учётом коэффициента Стьюдента для 95% уровня вероятности. Погрешности измерений получились: $\Delta FD = 0.5\%$, $\Delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf}) = 6 \cdot 10^{-5}$ СИ. Так как параметры FD и $\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$ измеряются не непосредственно, а рассчитываются из магнитной восприимчивости, погрешность определения этих параметров зависит от значений магнитной восприимчивости образца и его FD. Так как образцы Витимских базальтов (2) близки по этим параметрам, то и данную оценку погрешности можно принять и для других образцов этой группы.

Результаты измерений магнитной вязкости образцов Витимских базальтов (2) с доверительными интервалами изображены на рисунке 2.2. Как видно из рисунка, для большинства образцов различие по фактору FD практически не выходит за рамки погрешности измерений. Исходя из результатов измерения разности магнитной восприимчивости на различных частотах, образцы можно условно разделить на группы, внутри которых

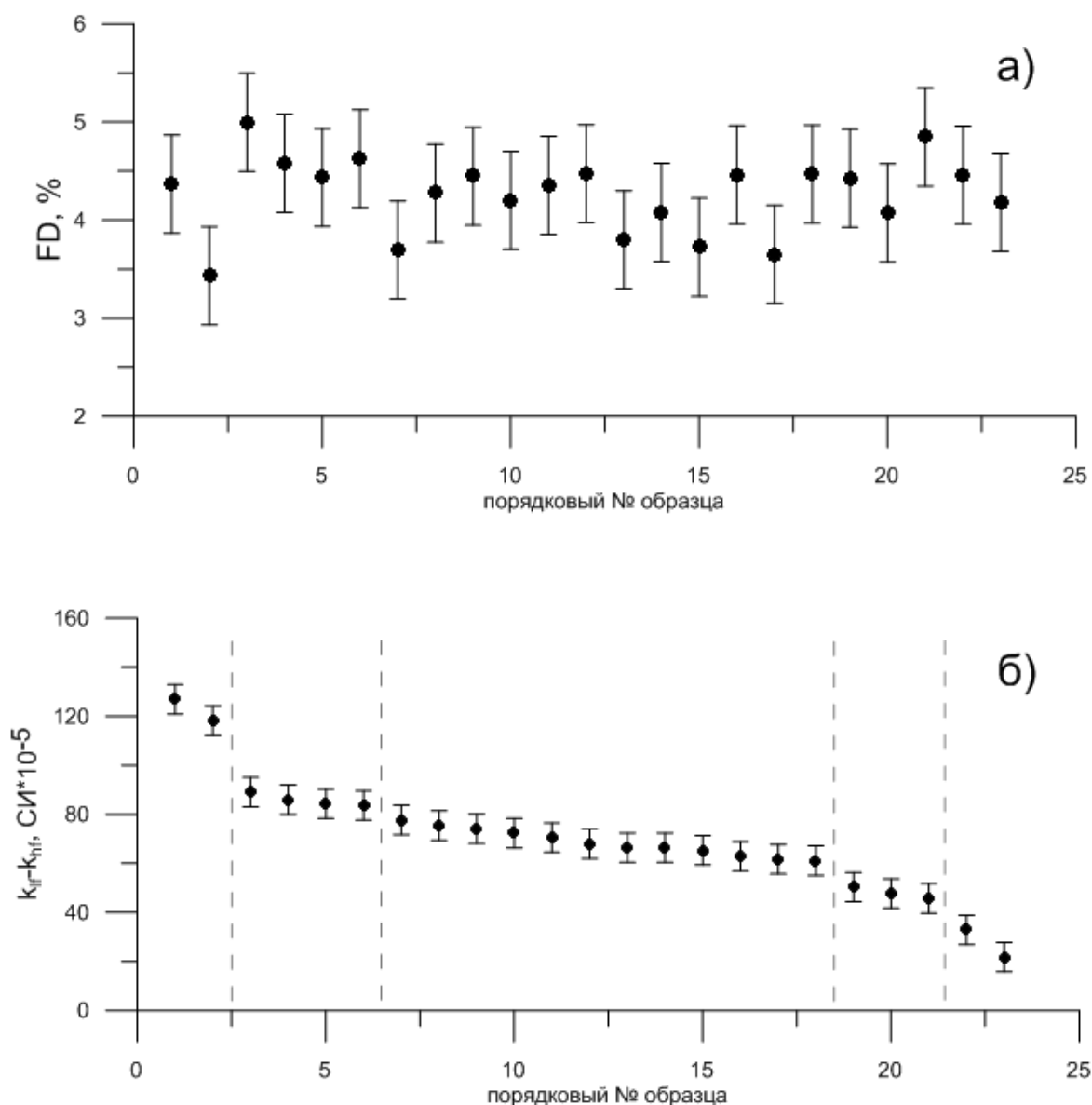


Рисунок 2.2 – Результаты измерения параметров FD (а) и $k_{lf} - k_{hf}$ (б) Витимских базальтов с указанием погрешности измерений. Результаты отсортированы по уменьшению значения параметра $k_{lf} - k_{hf}$. Пунктирной линией обозначается условное разделение образцов на группы.

различие образцов не превышает погрешности измерений (в таблице 2.3 группы выделены разными цветами).

2.4.1 Влияние температуры и положения образца на погрешность измерения магнитной восприимчивости.

Для повышения точности была предпринята попытка увеличить количество измерений, чтобы набором статистики уменьшить случайную составляющую погрешности измерений. Однако выяснилось, при многократных измерениях одного образца (больше 10) значения магнитной восприимчивости монотонно возрастают. Оказалось, что если периодически держать образец в руках, то он нагревается, и значения его магнитной восприимчивости повышаются на несколько процентов.

Для оценки температурного дрейфа измерялась магнитная восприимчивость сильномагнитных образцов на приборе Bartington MS2 при различной температуре. Температура устанавливалась с помощью кондиционера в комнате, в которой образцы выдерживались несколько часов перед измерениями, и контролировалась калиброванным ртутным термометром. Таким образом удалось провести измерения в интервале от 18°C до 29°C. Кроме этого была оценена магнитная восприимчивость при 0°C. Для этого образцы помещались в ванночку со смесью льда и воды (в гидроизоляционной оболочке) на 1 час. Результаты исследований одного из образцов изображены на рисунке 2.3.

На рисунке 2.3 видно, что магнитная восприимчивость в зависимости от температуры изменяется по линейному закону (в этом температурном диапазоне). Магнитная восприимчивость с каждым градусом изменяется на 10^{-4} единиц СИ, что составляет около 1% от измеряемой восприимчивости. С учётом того, что периодический контакт экспериментатора с образцами приводит к дрейфу магнитной восприимчивости на несколько процентов, температура образца по мере проведения эксперимента может изменяться на

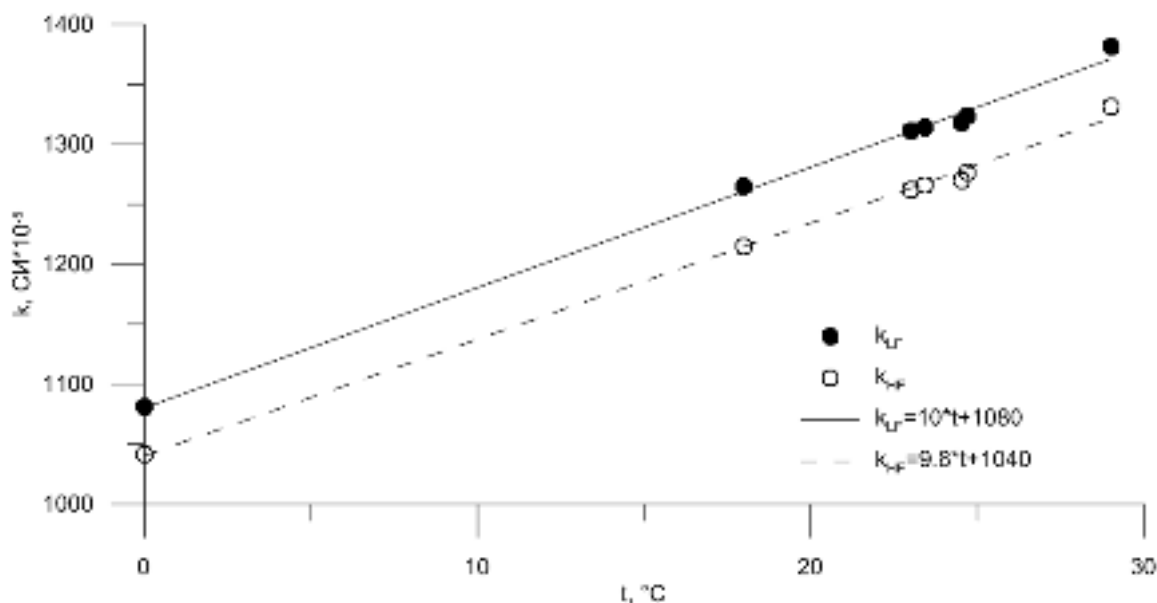


Рисунок 2.3 – График зависимости магнитной восприимчивости образца 5-1 от температуры на низкой и высокой частотах. Так же приведены результаты аппроксимации линейной функцией.

несколько градусов. Поскольку для большинства образцов FD не превышает 2-5%, такой температурный дрейф магнитной восприимчивости может внести очень большую ошибку в результаты эксперимента.

Ещё одним источником погрешности является неконтролируемое изменение положения образца в держателе. Образцы для исследований не идеальной формы, зачастую могут быть несколько меньше образцового кубика или иметь не совсем прямые углы. Из-за люфта образца внутри держателя его ориентация может меняться на 2-5 градусов относительно центральной оси образца. Если при этом образец обладает анизотропией порядка 1.2, то подобные смещения могут приводить к изменению магнитной восприимчивости примерно на 0.5%. Такой дрейф меньше чем температурный, но его труднее контролировать.

2.4.2 Анализ погрешностей измерения параметров ($\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$) и FD

Как уже говорилось ранее, при исследовании магнитной вязкости интересующая нас величина измеряется не напрямую, а является разностью двух измерений магнитной восприимчивости на разных частотах. Таким образом, погрешность определения разности магнитных восприимчивостей зависит не только от точности их измерений, но и от величин статической и динамической магнитных восприимчивостей. Чтобы разобраться в этом, необходимо провести анализ возможных погрешностей.

По поводу оценки погрешностей измерений частотно-зависимой магнитной восприимчивости написано немного. Некоторые рекомендации по методике измерений с помощью моста Bartington MS2 содержатся в руководстве. Кроме этого, недавно появилась статья [Hroudá, Pokorný, 2011], где показано, что при изучении проявлений магнитной вязкости в частотной области к точности измерений магнитной восприимчивости предъявляются очень высокие требования.

Основная проблема при исследованиях магнитной вязкости в частотной области заключается в том, что интересующая величина является разностью двух близких по значению измеряемых величин. Таким образом, для достижения погрешности FD в 10% даже для образцов со значительным содержанием суперпарамагнитных частиц необходимо измерить магнитную восприимчивость с точностью не менее 0.2-0.5%.

Результирующая ошибка измерений с помощью моста Bartington MS2 включает инструментальную погрешность прибора, определяемую его разработчиками как sensitivity (чувствительность), и дрейф. Кроме аппаратного дрейфа экспериментатор также может вносить систематическую погрешность, связанную с изменением температуры, положения и ориентации образца при измерениях на разных частотах. Обозначим абсолютную инструментальную погрешность определения магнитной восприимчивости

как $\Delta\kappa$. При измерении слабомагнитных образцов $\Delta\kappa = 0.1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, сильномагнитных – $\Delta\kappa = 1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ [Dearing, 1994].

Абсолютная погрешность, возникающая за счет дрейфа, определяется как $\text{drift} \cdot \kappa$, где κ – измеренное значение магнитной восприимчивости, drift – относительная погрешность, вызываемая дрейфом, которая может достигать 1% [Dearing, 1994].

Для оценки качества измерений представляет интерес анализ относительных погрешностей величин $\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$ и FD . Обозначим относительную погрешность, выраженную в процентах от измеряемой величины, как δ . Очевидно,

$$\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf}), \% = 100 \cdot \frac{\Delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})}{\kappa_{lf} - \kappa_{hf}},$$

$$\delta(FD), \% = 100 \cdot \frac{\Delta(FD)}{FD},$$

где $\Delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$, $\Delta(FD)$ – абсолютные погрешности измерения $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ и FD , соответственно.

Воспользовавшись известным правилом нахождения абсолютной ошибки результата косвенных измерений, а также выражениями для относительных ошибок суммы, разницы и частного двух величин [см., например, Сквайрс, 1971, с. 45], с помощью элементарных выкладок легко показать, что

$$\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf}), \% = 100 \left[\frac{2(\Delta\kappa)^2 + (\text{drift} \cdot \kappa_{lf})^2 + (\text{drift} \cdot \kappa_{hf})^2}{(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})^2} \right]^{1/2}, \quad (2.6)$$

$$\delta(FD), \% = 100 \left[\frac{2(\Delta\kappa)^2 + (\text{drift} \cdot \kappa_{lf})^2 + (\text{drift} \cdot \kappa_{hf})^2}{(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})^2} + \frac{(\Delta\kappa)^2 + (\text{drift} \cdot \kappa_{lf})^2}{\kappa_{lf}^2} \right]^{1/2}. \quad (2.7)$$

Как известно, даже для образцов с очень сильными проявлениями магнитной вязкости высокочастотная восприимчивость отличается от низкочастотной не более чем на 10 – 15% [Dearing, 1994; Dearing et al., 1996].

С учетом этого, поскольку речь идет не о «точном» вычислении погрешностей, а об их оценке – можно принять, что $\text{drift} \cdot \kappa_{hf} \approx \text{drift} \cdot \kappa_{lf}$. Тогда выражение (2.6) преобразуется к виду:

$$\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf}), \% = 100\sqrt{2} \cdot \frac{\left[(\Delta\kappa)^2 + (\text{drift} \cdot \kappa_{lf})^2 \right]^{1/2}}{\kappa_{lf} - \kappa_{hf}}. \quad (2.8)$$

Поскольку $\kappa_{lf} - \kappa_{hf} \ll \kappa_{lf}$, второе слагаемое в квадратных скобках формулы (2.6) намного меньше первого и им можно пренебречь. Поэтому $\delta(FD)$ описывается выражением, аналогичным (2.8):

$$\delta(FD), \% = 100\sqrt{2} \cdot \frac{\left[(\Delta\kappa)^2 + (\text{drift} \cdot \kappa_{lf})^2 \right]^{1/2}}{\kappa_{lf} - \kappa_{hf}}. \quad (2.9)$$

С учетом того, что $\kappa_{lf} - \kappa_{hf} = FD \cdot \kappa_{lf}$ последнее выражение можно записать в виде

$$\delta(FD), \% = 100\sqrt{2} \cdot \frac{\left[(\Delta\kappa)^2 + (\text{drift} \cdot \kappa_{lf})^2 \right]^{1/2}}{FD \cdot \kappa_{lf}}. \quad (2.10)$$

Применение формул (2.6) и (2.7) иллюстрируют рисунки 2.4 и 2.5. На рисунке 2.4 показано, как $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ изменяется в зависимости от $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ для двух образцов – «слабомагнитного» ($\kappa_{lf} = 10 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) и «сильномагнитного» ($\kappa_{lf} = 10^3 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). При расчете графиков на рисунке 2.4 было принято, что FD каждого образца изменяется от 0.1 % (очень низкая доля суперпарамагнитных частиц) до 10% (большое относительное содержание суперпарамагнитных частиц). Соответственно, $\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$ слабомагнитного образца изменялась в диапазоне от $0.01 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, для сильномагнитного – от $1 \cdot 10^{-5}$ до $10^2 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Графики на рисунках 2.4 а, б, рассчитаны в предположении, что влиянием дрейфа можно пренебречь по сравнению с инструментальной погрешностью ($\text{drift} = 0$). При расчете $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ на рисунке 2.4 а принято, что $\Delta\kappa = 10^{-5}$ ед. СИ, на рисунке 2.4 б – $0.1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. При сравнении рисунка 2.4 а и рисунка 2.4 б видно, что в случае, когда можно пренебречь дрейфом,

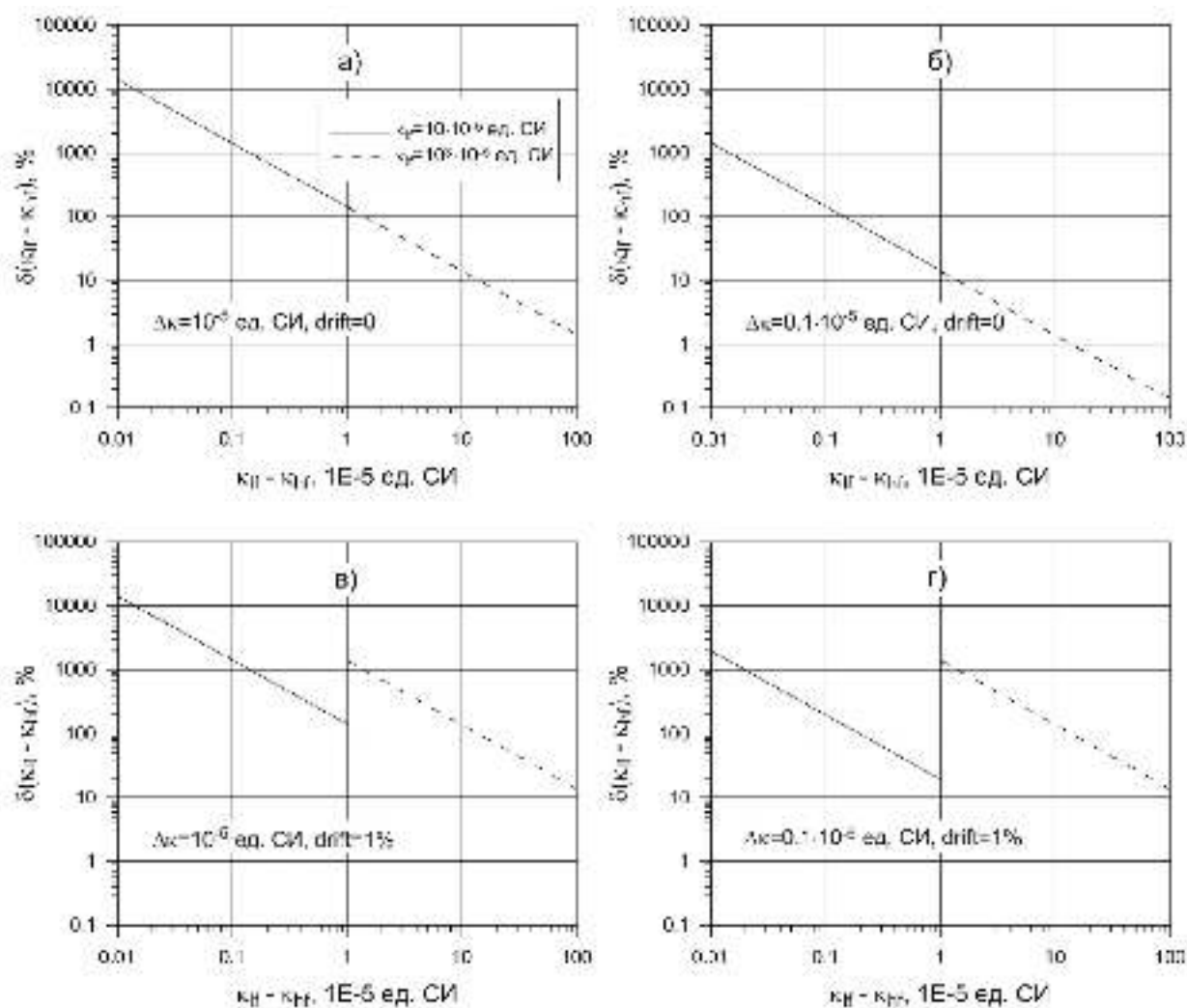


Рисунок 2.4 – Графики погрешности $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ в зависимости от $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ при отсутствии дрейфа (а, б) и в случае, когда относительная погрешность измерения магнитной восприимчивости вследствие влияния дрейфа составляет 1% (в, г). Инструментальная погрешность: 10^{-5} ед. СИ (а, в) и $0.1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ (б, г).

$\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ изменяется прямо пропорционально инструментальной погрешности и обратно пропорционально разности $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$.

При малых значениях $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$, т.е. при изучении слабомагнитных образцов, погрешность определения $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ может быть очень большой. Так, при $\Delta\kappa = 10^{-5}$ ед. СИ относительная погрешность измерения $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ слабомагнитного образца превышает 100%, даже если $FD = 10\%$ (соответствует $\kappa_{lf} - \kappa_{hf} = 10^{-5}$ ед. СИ). Если же $\Delta\kappa = 0.1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ уменьшается на порядок. В этом случае для слабомагнитного образца, FD которого равно 10%, $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf}) = 10\%$.

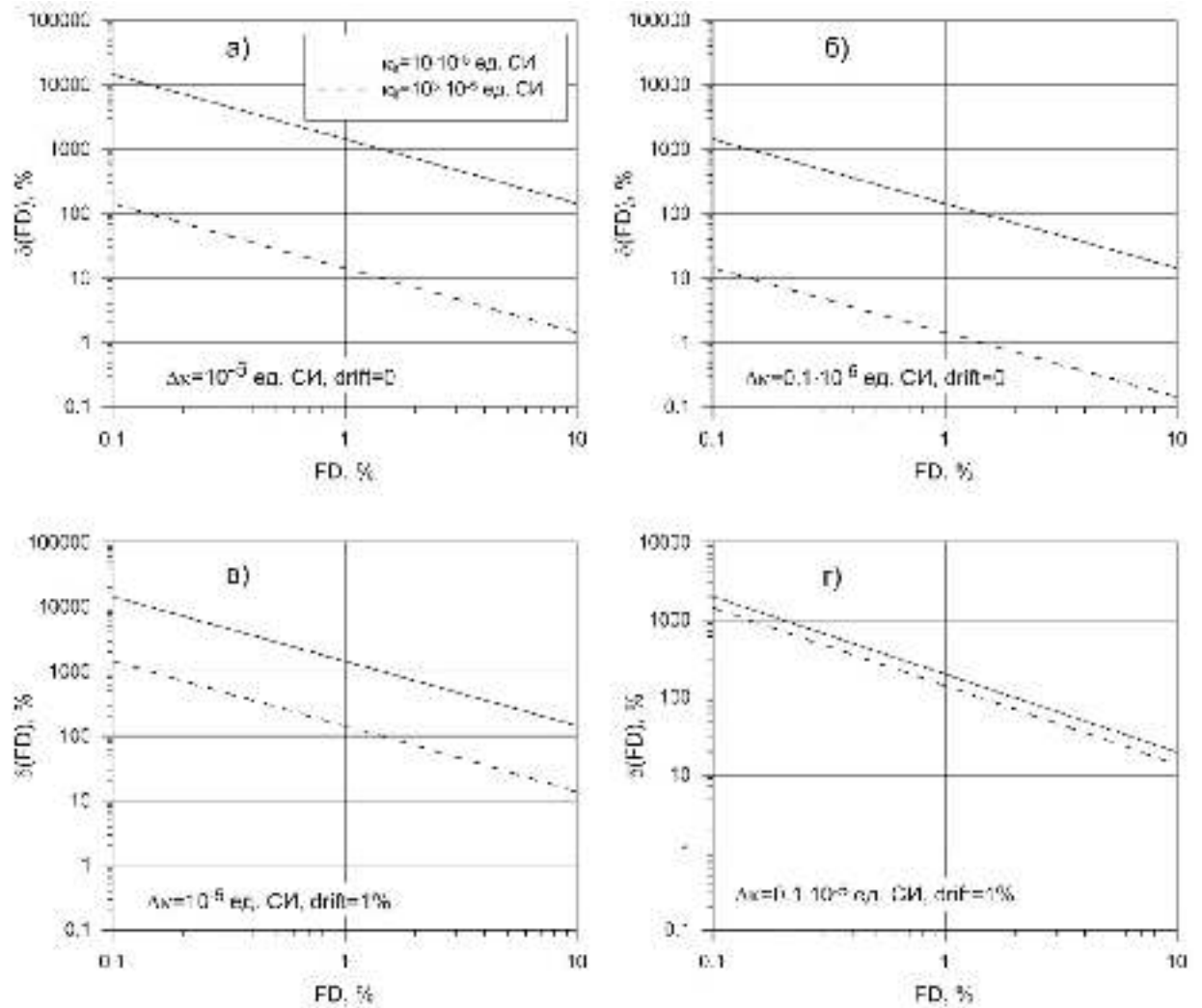


Рисунок 2.5 – Графики погрешности $\delta(FD)$ в зависимости от FD при отсутствии дрейфа (а, б) и в случае, когда относительная погрешность измерения магнитной восприимчивости вследствие влияния дрейфа составляет 1% (в, г). Инструментальная погрешность: 10^{-5} ед. СИ (а, в) и $0.1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ (б, г).

Для сильномагнитного образца погрешность $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ при $FD=1\%$ ($\kappa_{lf} - \kappa_{hf} = 10 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) составляет около 10%, при $FD=10\%$ ($\kappa_{lf} - \kappa_{hf} = 100 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) – всего 1%. Связь $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ с $\Delta\kappa$ и $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ становится особенно наглядной, если в (2.8) положить: $\text{drift} \cdot \kappa_{lf} = 0$. В этом случае, когда влиянием дрейфа можно пренебречь:

$$\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf}), \% = 100\sqrt{2} \cdot \frac{\Delta\kappa}{\kappa_{lf} - \kappa_{hf}}, \quad (2.11)$$

откуда видно, что в отсутствие дрейфа факторами, контролирующими результирующую относительную погрешность, являются разность между κ_{lf} и κ_{hf} и инструментальная погрешность прибора. Для слабомагнитных образцов

разность $\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$, которая стоит в знаменателе формулы (2.11), мала, что приводит к большой погрешности. Единственным способом уменьшить $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ при изучении слабомагнитных образцов является снижение инструментальной погрешности, однако последняя определяется используемой аппаратурой и возможность ее контроля экспериментатором практически отсутствует. Что касается сильномагнитных образцов, для которых разница $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ значительна даже при малых значениях FD , то они в рассматриваемом случае являются благоприятными объектами для измерения $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$.

Влияние дрейфа иллюстрирует рисунок 2.4 в, г, на которых показано, как $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ изменяется в зависимости от $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$, т.е. дрейф составляет 1% от измеряемого значения магнитной восприимчивости $\text{drift}=0.01$. Как можно видеть, при изучении слабомагнитных образцов влияние дрейфа незначительно. Однако когда исследуются сильномагнитные образцы, $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ определяется преимущественно дрейфом и почти не зависит от инструментальной погрешности. Это хорошо видно при сравнении рисунков 2.4 а, 2.4 в и особенно – 2.4 б и 2.4 г. Если для слабомагнитного образца результирующие погрешности остались практически теми же самыми, что и в отсутствии дрейфа, то для сильномагнитного образца появление однопроцентного дрейфа при $\Delta\kappa=10^{-5}$ ед. СИ привело к повышению $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$ почти на порядок, а при $\Delta\kappa=0.1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ – на два порядка! Возможные причины этого несложно понять. Например, небольшие вариации температуры сильномагнитного образца или его ориентации по отношению к датчику могут сильно повлиять на разность $(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$, тогда как при изучении слабомагнитного образца изменения окажутся незначительными.

Эти выводы подтверждаются анализом формулы (2.8). Если инструментальной погрешностью можно пренебречь по сравнению с дрейфом ($\Delta\kappa \ll \text{drift} \cdot \kappa_{lf}$),

$$\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf}), \% = 100\sqrt{2} \cdot \frac{drift \cdot \kappa_{lf}}{\kappa_{lf} - \kappa_{hf}}. \quad (2.12)$$

Поскольку в числителе здесь стоит произведение $drift \cdot \kappa_{lf}$, при изучении сильномагнитных (с большими значениями κ_{lf}) образцов дрейф может приводить к значительной результирующей погрешности $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$. С другой стороны, в данном случае можно попытаться оптимизировать методику измерений с тем, чтобы добиться снижения дрейфа и, тем самым, $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$.

Анализ относительной погрешности $\delta(FD)$ в зависимости от FD приводит к выводам, аналогичным тем, которые приводятся выше при рассмотрении $\delta(\kappa_{lf} - \kappa_{hf})$. Если дрейф отсутствует (Рисунок 2.5 а, б), погрешность $\delta(FD)$ прямо пропорциональна $\Delta\kappa$ и обратно пропорциональна κ_{lf} и FD . Поскольку в формуле (2.10) κ_{lf} и FD находятся в знаменателе, при изучении образцов с малым значением FD , особенно слабомагнитных, погрешность определения FD даже при $\Delta\kappa = 0.1 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ является неприемлемо высокой. Для конкретного образца (κ_{lf} и FD «заданы» и не зависят от экспериментатора) $\delta(FD)$ можно уменьшить только за счет снижения инструментальной погрешности. При измерении FD сильномагнитных образцов в представляющем практический интерес диапазоне ($1\% \leq FD \leq 10\%$) погрешность $\delta(FD)$ даже при $\Delta\kappa = 10^{-5}$ ед. СИ не превышает 10%.

Влияние дрейфа приводит к увеличению погрешности определения FD , особенно сильномагнитных образцов, что видно при сравнении рисунков 2.5 а и 2.5 в, 2.5 б и 2.5 г.

Таким образом, анализ погрешностей определения параметров $\Delta\kappa$ и FD с помощью двухчастотных измерений магнитной восприимчивости позволяет сделать следующие выводы:

При изучении частотно-зависимой магнитной восприимчивости необходимо учитывать две фундаментальные погрешности – инструментальную ($\Delta\kappa$) и связанную с дрейфом (*drift*).

Инструментальная погрешность, которая представляет собой меру или показатель того, насколько прецизионным является прибор, определяет относительную погрешность определения частотно-зависимых параметров ($\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$, FD) преимущественно слабомагнитных образцов. При изучении таких образцов необходимо использовать аппаратуру, обеспечивающую как можно меньшую инструментальную погрешность.

Погрешность дрейфа вызывается изменениями температуры датчика измерительной системы и образца, положения и ориентации образца относительно датчика, вибрациями, внешними электромагнитными помехами и т.п. Эта погрешность, влияние которой особенно велико при изучении сильномагнитных образцов, зависит по большей части от внешних факторов, которые *могут* контролироваться экспериментатором. Поэтому при изучении сильномагнитных образцов необходима такая методика измерений, которая по возможности снижает влияние факторов, приводящих к дрейфу.

С использованием формул (2.6) – (2.12) показано, что погрешности определения частотно-зависимых параметров магнитной восприимчивости с помощью распространенного двухчастотного моста Bartington MS2 могут быть очень большими, особенно в тех случаях, когда исследуются слабомагнитные образцы или же при изучении сильномагнитных образцов имеет место дрейф измерительной системы и/или параметров образца.

Несмотря на то, что анализ погрешности был проведён для прибора Bartington MS2 (одного из самых распространённых), его результаты можно применить и к другим приборам, например к недавно появившемуся мосту Kappabridge MKF-1. Прибор имеет значительно меньшую инструментальную погрешность (порядка 10^{-7} - 10^{-8} Си), однако он тоже обладает дрейфом (в описании прибора указано значение 0.3% для измерений на разных частотах) и подвержен тем же источникам систематической погрешности, увеличивающим дрейф результатов измерений. Эти обстоятельства делают дрейф основной причиной погрешности измерений (и для сильномагнитных,

и для слабомагнитных образцов). Таким образом, оценка погрешности определения параметров Δk и FD с помощью Kappabridge MKF-1 будет близка к рисункам 2.4 г и 2.5 г (штриховая линия).

2.5 Результаты измерения магнитной вязкости коллекции образцов.

После анализа погрешности исследований магнитной вязкости в частотной области методики измерений была несколько усовершенствована. Во-первых, чтобы не допустить изменения температуры по ходу измерений образцы выстаивались в той комнате в которой проводились измерения. Также исключался прямой контакт экспериментатора с образцами (все манипуляции с образцами проводились с помощью пластикового пинцета). Так же пристальное внимание уделялось положению образца.

2.5.1 Образцы горна

Измерения параметров магнитной восприимчивости и магнитной вязкости на образцах горна прибором Kappabridge MKF-1 приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты измерения магнитной восприимчивости образцов горна прибором Kappabridge MKF-1

№	κ_{f1} , 10^{-5} СИ	κ_{f2} , 10^{-5} СИ	κ_{f3} , 10^{-5} СИ	$FD(f_1-f_2)$, %	$FD(f_2-f_3)$, %	$FD(f_1-f_3)$, %
F7-1	2262	2147.1	2045.5	5.08	4.73	9.57
F14-5	1442.8	1371.3	1315.3	4.96	4.08	8.84
F17-3	1165.7	1107.3	1064.1	5.01	3.90	8.72
F7-9	2766.3	2639.8	2534.8	4.57	3.98	8.37
F14-2	1346.4	1285.6	1236.8	4.52	3.80	8.14
F7-3	3038.9	2928.3	2810	3.64	4.04	7.53
F7-4	2892.2	2769.5	2677.9	4.24	3.31	7.41
F6-3	504.53	481.56	470.36	4.55	2.33	6.77
F17-2	625.77	598.19	583.76	4.41	2.41	6.71
F9-5	436.79	417.22	407.94	4.48	2.22	6.61

Таблица 2.5 – Продолжение

№	$\kappa_{\text{П}}, 10^{-5} \text{ СИ}$	$\kappa_{\text{П}}, 10^{-5} \text{ СИ}$	$\kappa_{\text{В}}, 10^{-5} \text{ СИ}$	$\text{FD}(f_1-f_2), \%$	$\text{FD}(f_2-f_3), \%$	$\text{FD}(f_1-f_3), \%$
F9-1	184.93	176.6	173.1	4.50	1.98	6.40
F14-6	1116.2	1077.2	1045.1	3.49	2.98	6.37
F9-2	461.84	441.78	432.89	4.34	2.01	6.27
F6-1	439.93	420.53	412.56	4.41	1.90	6.22
F14-1	820.82	787.66	770.05	4.04	2.24	6.19
F9-6	799.64	765.66	750.21	4.25	2.02	6.18
F5-9	711.77	681.89	669.27	4.20	1.85	5.97
F16-3	682.36	653.74	641.7	4.19	1.84	5.96
F16-2	824.64	790.24	775.73	4.17	1.84	5.93
F14-4	683.71	659.29	643.38	3.57	2.41	5.90
F14-9	1112.5	1072	1046.9	3.64	2.34	5.90
F5-5	936.9	900.69	882.62	3.86	2.01	5.79
F12-3	1281.9	1229.4	1207.7	4.10	1.77	5.79
F9-8	593.78	569.45	559.68	4.10	1.72	5.74
F22-4	879.11	859.66	832.42	2.21	3.17	5.31
F6-2	440.99	423.2	417.8	4.03	1.28	5.26
F2-5	294.28	286.23	279.13	2.74	2.48	5.15
F10-2	3333.4	3284.7	3164	1.46	3.67	5.08
F5-7	740.93	714.07	704.48	3.63	1.34	4.92
F9-7	255.1	245.16	243.07	3.90	0.85	4.72
F5-3	501.08	482.7	477.52	3.67	1.07	4.70
F14-7	570.51	549.76	545.18	3.64	0.83	4.44
F7-2	3233.7	3172.2	3102.2	1.90	2.21	4.07
F9-4	405.32	391.46	389.08	3.42	0.61	4.01
F5-12	915.63	892.85	879.8	2.49	1.46	3.91
F5-11	1838.4	1808.9	1770.1	1.60	2.14	3.72
F23-2	78.71	76.558	75.838	2.73	0.94	3.65
F5-1	741.59	716.79	714.74	3.34	0.29	3.62
F13-3	702.2	682.55	678.21	2.80	0.64	3.42
F5-6	1091	1056.8	1055.2	3.13	0.15	3.28
F10-1	7302.5	7298	7063.9	0.06	3.21	3.27
F21-1	36.708	35.493	35.537	3.31	-0.12	3.19
F10-3	982.46	963.8	951.28	1.90	1.30	3.17
F26-1	197.74	191.48	191.49	3.17	-0.01	3.16

Таблица 2.5 – Продолжение

№	$\kappa_{f1}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f2}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f3}, 10^{-5}$ СИ	FD(f_1-f_2), %	FD(f_2-f_3), %	FD(f_1-f_3), %
F20-2	146.41	141.79	142.32	3.16	-0.37	2.79
F25-2	681.51	664.19	663.24	2.54	0.14	2.68
F5-2	554.41	539.16	539.84	2.75	-0.13	2.63
F5-10	2103.5	2051.7	2050.9	2.46	0.04	2.50
F2-2	1619.8	1585.2	1581.6	2.14	0.23	2.36
F2-3	3405.1	3346.7	3326.6	1.72	0.60	2.31
F22-2	2828.1	2788.6	2772.3	1.40	0.58	1.97
F4-4	678.16	661.24	665.87	2.49	-0.70	1.81
F23-1	50.732	49.231	49.813	2.96	-1.18	1.81
F10-4	3501.8	3441.7	3440.3	1.72	0.04	1.76
F13-3	4804.7	4755.4	4732.9	1.03	0.47	1.49
F13-2	7619.5	7616.4	7581.7	0.04	0.46	0.50
F10-5	66.328	64.139	64.232	3.30	-0.14	3.16
F2-1	804.86	782.02	780.31	2.84	0.22	3.05
F22-1	2461.1	2407.8	2392.2	2.17	0.65	2.80

2.5.2 Образцы африканского песка

Измерения параметров магнитной восприимчивости и магнитной вязкости на образцах африканского песка прибором Каррабридж МКФ-1 приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты измерения магнитной восприимчивости образцов африканского песка прибором Каррабридж МКФ-1.

№	$\kappa_{f1}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f2}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f3}, 10^{-5}$ СИ	FD(f_1-f_2), %	FD(f_2-f_3), %	FD(f_1-f_3), %
Af1	4499.20	4318.00	4129.50	4.03	4.37	8.22
Af2	4292.60	3952.30	3498.20	7.93	11.49	18.51

2.5.3 Образцы кирпичей

Измерения параметров магнитной восприимчивости и магнитной вязкости на образцах кирпичей прибором Каррабридж МКФ-1 приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты измерения магнитной восприимчивости образцов кирпичей прибором Kappabridge MKF-1.

№	$\kappa_{f1}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f2}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f3}, 10^{-5}$ СИ	FD(f_1-f_2), %	FD(f_2-f_3), %	FD(f_1-f_3), %
K1	388.2	368.24	345.34	5.13	6.2	11
K2	3.26	3.225	2.766	1.18	14.2	15.3

2.5.4 Образцы туфов

Измерения параметров магнитной восприимчивости и магнитной вязкости образцов туфов прибором Kappabridge MKF-1 приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты измерения магнитной восприимчивости образцов туфов прибором Kappabridge MKF-1.

№	$\kappa_{f1}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f2}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f3}, 10^{-5}$ СИ	FD(f_1-f_2), %	FD(f_2-f_3), %	FD(f_1-f_3), %
1	1625.9	1511.9	1378.2	7	8.8	15.2
2	416.18	397.18	377.08	4.6	5.1	9.4
3	524.97	504.24	484.12	3.9	4	7.8
4	380.23	366.53	354	3.6	3.4	6.9
5	386.91	370.97	355.28	4.1	4.2	8.2

2.5.4 Магнитная фракция из отвалов археологического раскопа

Измерения параметров магнитной восприимчивости и магнитной вязкости магнитной фракции из отвалов археологического раскопа прибором Kappabridge MKF-1 приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты измерения магнитной восприимчивости образцов туфов прибором Kappabridge MKF-1.

№	$\kappa_{f1}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f2}, 10^{-5}$ СИ	$\kappa_{f3}, 10^{-5}$ СИ	FD(f_1-f_2), %	FD(f_2-f_3), %	FD(f_1-f_3), %
met56	23330	23598	23335	-1.15	1.11	-0.02
met57	29027	29469	29523	-1.52	-0.18	-1.71
met63	25771	26059	25747	-1.12	1.20	0.09

2.6 Выводы

Необходимой предпосылкой для оценки индукционных импульсных характеристик намагниченности в качестве метода изучения магнитной вязкости является сопоставление параметров магнитной вязкости, определённых по импульсным характеристикам намагниченности образцов, с параметрами, найденными другим известным способом.

Для сравнения был выбран метод основанный на измерении магнитной восприимчивости на нескольких частотах. Этот метод является производительным, сравнительно дешёвым и при этом достаточно информативным, поэтому нашёл своё применение при изучении магнетизма горных пород.

Для создания референтной базы результатов измерений параметров магнитной вязкости в частотной области сформирована коллекция образцов. Коллекция включает образцы типичных природных и антропогенных геологических сред с широким диапазоном проявления магнитной вязкости, что позволяет рассматривать её как эталонную и/или представительную.

Измерения в частотной области с использованием приборов Bartington MS2 и AGICO Kappabridge MKF1, а также общий анализ погрешностей средствами теории ошибок показали, что поскольку параметры Δk и FD находятся путём вычитания двух близких величин, погрешность определения этих параметров может достигать десятков и даже сотен процентов. Благодаря использованию специальных методических приёмов удалось снизить влияние факторов, вносящих погрешности, что позволило сформировать представительную базу данных измерений в частотной области для сравнения с параметрами магнитной вязкости, определённых по импульсным характеристикам намагниченности.

Глава 3

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

Проявления магнитной вязкости изучаются как в частотной, так и во временной областях. Сошлёмся, в частности, на метод магнитной гранулометрии, основанный на измерении спада изотермической остаточной намагниченности J_r после выключения внешнего намагничивающего поля, т.е. *переходной* характеристики намагниченности [Worm, 1999; Machac et al., 2007; Wang et al., 2010].

Напомним, что при измерениях в частотной области парамагнитные минералы и многодоменные ферромагнитные зерна намагничиваются практически синфазно с приложенным магнитным полем. Поэтому вклад суперпарамагнитных частиц наблюдается на фоне первичного поля, что может приводить к большим погрешностям измерения частотно-зависимой восприимчивости [Hrouda, Pokorný, 2011; Кожевников и др., 2014]. Переходная же характеристика вязкой остаточной намагниченности измеряется в отсутствии первичного поля, что является важным преимуществом измерений во временной области [Великин, 1971; McNeill, 1980].

Обычно измерение спада намагниченности осуществляется с высокой плотностью экспериментальных точек в широком временном диапазоне, перекрывающем не менее двух порядков [Wang et al., 2010]. В числе прочего это способствует снижению неоднозначности решения обратной задачи магнитной гранулометрии, т.е. отыскания такого распределения размеров однодоменных зерен, которое наилучшим образом объясняет экспериментальные данные.

В качестве «базового» параметра, характеризующего спад остаточной намагниченности J_r , часто используют коэффициент магнитной вязкости S , определяемый как [Трухин, 1973; Yu, Tauche, 2006]:

$$S = \frac{dJ_r}{d(\log t)}.$$

Обычно S оценивают по наклону кривой спада вязкой намагниченности. Считается, что он приблизительно пропорционален вкладу суперпарамагнитных зерен [Dunlop, 1973].

Вместе с тем этот метод также не свободен от некоторых ограничений. В общем случае суммарная остаточная намагниченность J_r в каждый момент времени t после снятия внешнего поля может быть представлена в виде двух слагаемых, или компонент:

$$J_r = J_1 + J_2, \quad (3.1)$$

где J_1 – стабильная компонента остаточной намагниченности, т.е. такая, которая не изменяется за время эксперимента; J_2 – спадающая во времени или вязкая намагниченность, зависящая от распределения размеров ультрадисперсных частиц ферромагнитных минералов.

Как уже отмечалось, одна из проблем измерений частотно-зависимой магнитной восприимчивости заключается в том, что вклад суперпарамагнитных частиц измеряется на фоне первичного магнитного поля, которое намного больше вторичного, создаваемого вязкой намагниченностью СПМ частиц. В известной мере аналогичная ситуация имеет место при измерении переходной характеристики намагниченности. Поскольку J_1 отличается от J_r не более, чем на несколько процентов [Wang et al., 2010; Sagnotti & Winkler, 2012], и, кроме того, «точное» значение J_1 неизвестно, относительная погрешность определения J_2 , особенно на поздних временах, может оказаться значительной.

Другое ограничение при измерении спада остаточной намагниченности связано с тем, что по причинам технического характера регистрация $J_r(t)$ начинается на довольно поздних (от 0.3 с до 15 с) временах [Worm, 1999; Wang

et al., 2010]. В качестве минимальной оценки начального времени регистрации можно принять $t=0.1$ с.

После снятия внешнего магнитного поля, в котором ансамбль однодоменных частиц одинакового размера приобрел намагниченность J_0 , намагниченность убывает по экспоненциальному закону (см. главу 1):

$$J(t) = J_0 \exp(-t/\tau).$$

где τ – постоянная времени релаксации намагниченности, определяемая как (1.1):

$$\tau = \tau_0 \exp(KV/kT),$$

где K – постоянная магнитной анизотропии, V – объем частицы, T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана. В литературе приводятся разные значения τ_0 , однако чаще всего принимают, что $\tau=10^{-9}$ с. Для частиц с одноосной анизотропией [Worm and Jackson, 1999; Wang et al., 2010; Dunlop, 1983; Dunlop and Özdemir, 1997; Worm, 1999]:

$$K = \mu_0 H_k J_s / 2,$$

здесь $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума, H_k – микроскопическая коэрцитивная сила (поле анизотропии), J_s – намагниченность насыщения. Таким образом,

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\mu_0 V J_s H_k}{2kT}\right). \quad (3.3)$$

Для ансамбля не взаимодействующих однодоменных частиц поле $H_k = 2.09H_c$, где H_c – макроскопическая коэрцитивная сила [Stoner and Wohlfarth, 1948; Wang et al., 2010].

С учётом отмеченных выше ограничений на диапазон измерений в области ранних времен предположим, что на переходную характеристику намагниченности оказывают влияние зерна с постоянной времени $\tau \geq 0.1$ с. Тогда, приняв, что для магнетита $K=2.5 \cdot 10^4$ Дж/м³ [Hrouda, 2011], и воспользовавшись формулой (3.3), находим, что при комнатной ($T=300^\circ$ К) температуре релаксация намагниченности зёрен с объёмом менее

$V_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ (соответствующий диаметр сферической частицы, $d_{\min} \approx 9 \text{ нм}$) оказываются «невидимыми». Отметим, что частицы с такими размерами могут составлять значительную долю в природных ансамблях суперпарамагнитных зерен [Galindo-Gonzalez et al., 2009].

3.1 Импульсная характеристика намагниченности

Очевидно, от перечисленных ограничений в значительной мере свободны индукционные системы, в которых с помощью приёмной катушки измеряется не сама намагниченность, а её производная по времени, т.е. *импульсная характеристика* намагниченности. Эти системы реагируют на суперпарамагнитные частицы с $\tau \leq 0.1 - 1 \text{ с}$. Таким образом, лабораторные измерения импульсной характеристики намагниченности с помощью индукционных систем дополняют имеющийся набор петромагнитных методов, используемых в магнитной гранулометрии.

На рисунке 3.1 в схематичном виде представлена индукционная система, включающая источник первичного намагничивающего магнитного поля в виде катушки, через которую пропускаются прямоугольные импульсы тока.

Во время пропускания тока через генераторную катушку образец намагничивается создаваемым ею первичным магнитным полем. После выключения тока в генераторной катушке намагниченность образца описывается выражением (3.1). В каждый момент времени t магнитный поток Φ , пронизывающий приёмную катушку, пропорционален намагниченности образца:

$$\Phi(t) = cJ_r(t) = c[J_1 + J_2(t)],$$

здесь c – не зависящий от времени коэффициент, определяемый геометрией и взаимным расположением катушек и образца, а также такими параметрами системы, как число витков в катушках, ток в генераторной катушке и т.п.

Изменяющийся во времени магнитный поток индуцирует в приёмной катушке ЭДС, пропорциональную скорости его изменения:

$$e(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -c \frac{dJ_2}{dt}.$$

ЭДС, индуцируемая в приёмной катушке, свободна от влияния стабильной во временном масштабе эксперимента компоненты остаточной намагниченности.

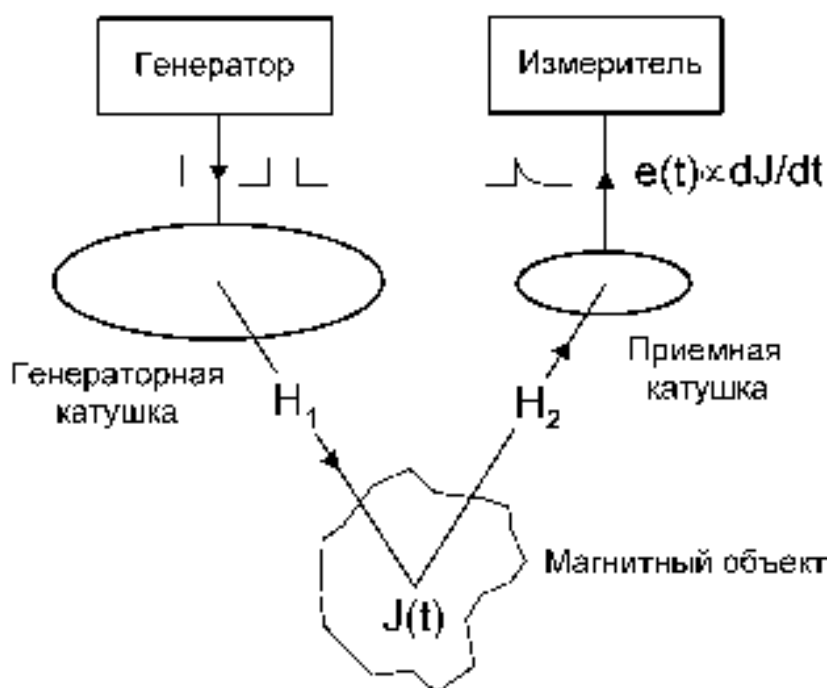


Рисунок 3.1 – Индукционная система для измерения импульсной характеристики вязкой намагниченности.

3.2 Лабораторная установка для измерения импульсной характеристики намагниченности

Имеющийся опыт изучения импульсных характеристик намагниченности магнитовязких образцов по большей части ограничен случаями, когда измерения проводились с целью выяснить причину аномально медленно спадающей ЭДС, наблюдавшейся при съемках МПП [Buselli, 1982; The Geophysics of ... , 1980; Захаркин и др., 1988; Кожевников, Снопков, 1995; Kozhevnikov et al., 2001; Neumann et al., 2005; Neumann, 2006]

либо проиллюстрировать эквивалентность измерений в частотной и временной областях [Dabas and Skinner, 1993].

Если же целью измерений импульсных индукционных характеристики магнитовязких образцов является оценка содержания СПМ зёрен, а тем более распределения их размеров, сначала необходимо провести исследования, направленные на выяснение возможностей лабораторной индукционной установки в зависимости от параметров катушечной системы, размеров и магнитных свойств образца, диапазона временных задержек и т.п. Насколько автору известно, подобные исследования пока не проводились.

Для того чтобы восполнить отмеченный пробел, проведено систематическое изучение магнитовязких образцов индукционными катушечными системами. Исследования проводились поэтапно: каждая последующая версия катушечной системы изготавливалась с учётом опыта, приобретенного при работе с предыдущей версией. Аналогичный подход применялся и по отношению к методике измерений.

3.3 Методика измерений.

Для возбуждения и регистрации переходных процессов использовалась аппаратура FastSnap для метода переходных процессов (<http://www.sibgeosystems.ru/hardware/FastSnap/>). Аппаратура состоит из коммутатора тока и измерителя, управляемого компьютером через адаптер линии связи. Коммутатор тока формирует в генераторной петле или катушке прямоугольные импульсы тока чередующейся полярности, разделенные паузой. Максимальная амплитуда импульсов составляет 10 А, период повторения – от 20 мс до 1 с. Коммутатор питается от аккумулятора напряжением 12 В. ЭДС переходного процесса измеряется в дискретные моменты времени. Шаг дискретизации составляет от 25 нс до 205 мкс, максимальное число отсчетов при измерении единичной реализации переходного процесса – 14000. Основу измерителя составляет 14-ти

разрядный прецизионный аналого-цифровой преобразователь, на вход которого после предварительного усиления поступает сигнал с приемной петли или рамки, а при измерениях на образцах – катушки. С учётом накопления смеси «сигнал + шум» динамический диапазон измерителя составляет не менее 120 дБ, что позволяет регистрировать сигналы в диапазоне от долей мкВ до 1 В.

На рисунке 3.2 представлена фотография лабораторной установки. Первые исследования проводились на керне базальтов (1), так как из него удалось выпилить образцы большого объёма (диаметр 63 мм, высота – 30 мм). Большой размер образцов гарантировал высокое содержание суперпарамагнитных частиц и был привлекателен для первого опыта подобных измерений. Для измерений были изготовлены катушки с генераторной и приёмной обмотками, каждая из которых состояла из 100 витков (резонансная частота $f = 510$ кГц) [Камнев и др., 2012]. Геометрические параметры катушки выбирались таким образом, чтобы

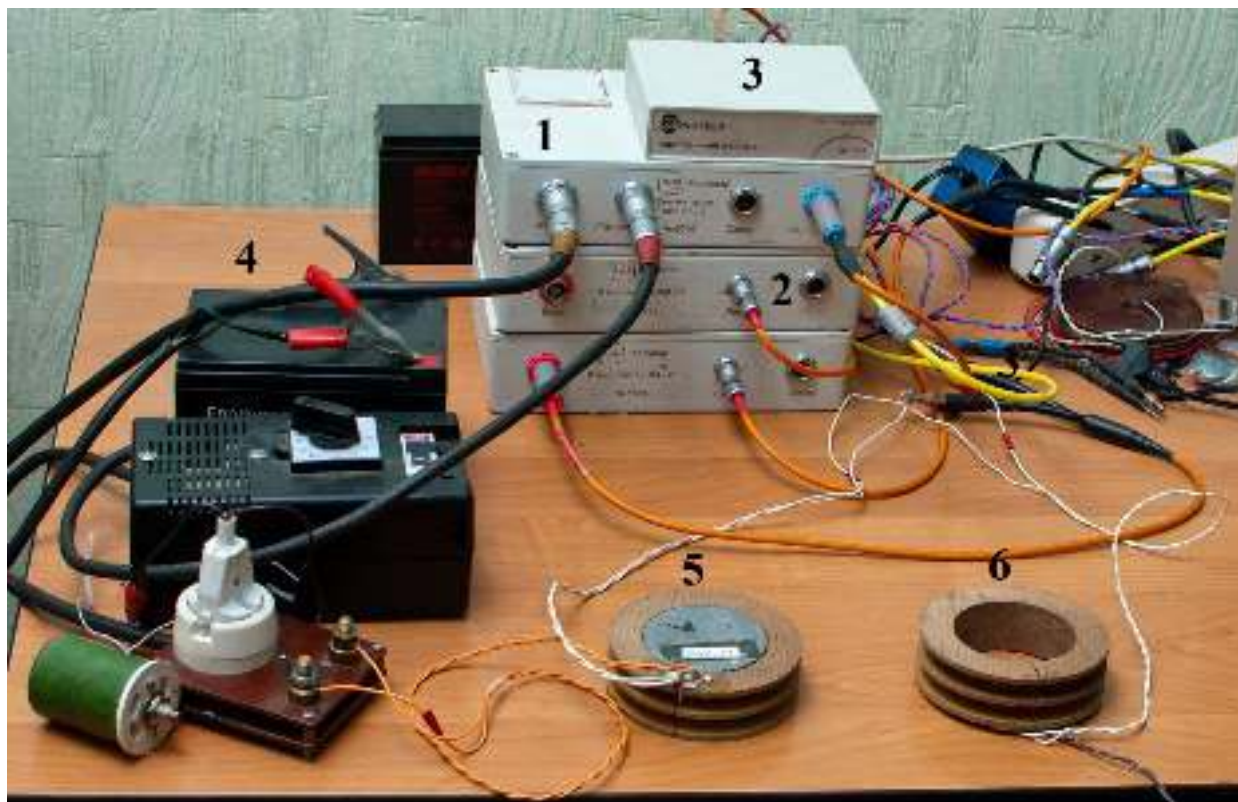


Рисунок 3.2 – Установка для измерения магнитной вязкости: 1 – коммутатор тока; 2 – измеритель; 3 – адаптер линии связи; 4 – аккумулятор, питающий генераторную обмотку; 5, 6 – катушки.

обеспечить эффективное потокоцепление между генераторной обмоткой и образцом, а также между образцом и измерительной обмоткой. Для уменьшения помех использовалась отдельная катушка, идентичная измерительной обмотке и включенная таким образом, что обе образовывали компенсационную систему.

После помещения образца в генераторно-приёмную катушку методика измерений выглядит следующим образом. В компьютерной программе FastEM-Registration устанавливаются параметры коммутатора и измерителя: период токовых импульсов, шаг дискретизации, количество отсчётов, количество импульсов, величина усиления. Сила тока в генераторной обмотке контролируется ограничителем (набором сопротивлений). Параллельно генераторной петле подключается шунтирующий резистор.

После запуска установки коммутатор попеременно подаёт положительные и отрицательные прямоугольные импульсы тока, разделённые паузами той же длительности, что и импульсы тока. Измеритель записывает ЭДС на приёмной обмотке начиная с момента выключения тока. Записанные кривые ЭДС обрабатываются программой TEM-Processing. Обработка состоит из процедур усреднения всех измеренных реализаций и дальнейшей аппроксимации полиномами. Обработанные кривые ЭДС экспортируются в текстовый файл.

При измерении индукционных импульсных характеристик значения ЭДС на поздних временах оказываются заниженными из-за недостаточной длительности токового импульса [Dabas and Skinner, 1993]. Поэтому результаты измерений на каждой временной задержке умножались на заранее рассчитанный поправочный коэффициент. Тем самым импульсная характеристика приводилось к такой, которая была бы измерена при бесконечной длительности токового импульса. На рисунке 3.3 изображено влияние момента включения тока и предыдущих токовых импульсов на текущий переходный процесс.

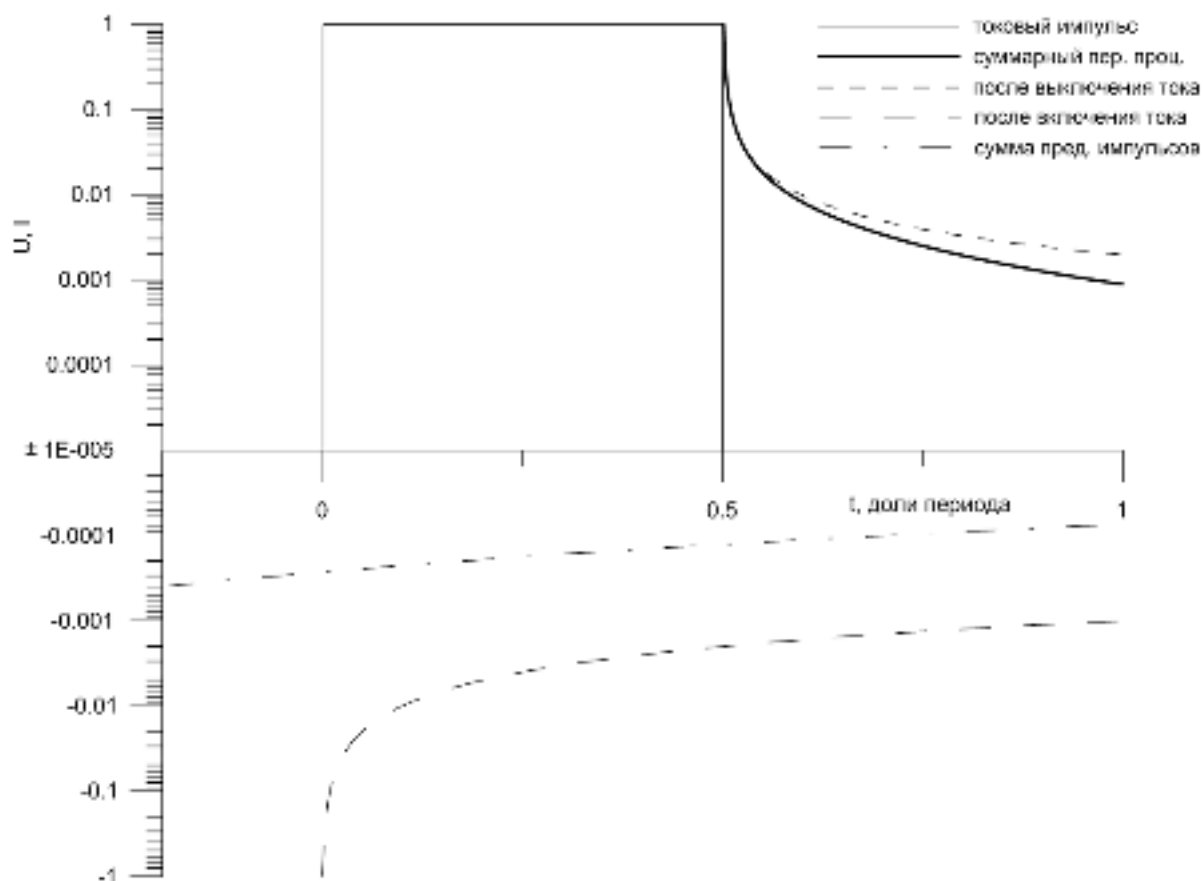


Рисунок 3.3 – Наложение переходных процессов. Штриховыми линиями изображены переходные процессы, вызванные включением и выключением тока, штрихпунктирная линия изображает сумму переходных процессов от предыдущих 100 импульсов тока. Жирной линией изображена суммарная импульсная характеристика, регистрируемая измерителем.

В таблице 3.1 приведены отношения амплитуды переходного процесса, рассчитанного при конечной длительности токового импульса (T) (с учётом влияния предыдущих импульсов) к амплитуде переходного процесса, рассчитанного для бесконечной длительности токового импульса $U_{изм}/U_{\infty}$. Амплитуды рассчитывались для переходного процесса $U = t^{-1}$.

Из таблицы видно, что если время измерения равно длине токового импульса, то амплитуда переходного процесса на поздних временах занижается предыдущими импульсами в 2 раза (на рисунке и в таблице приведены результаты суммирования 100 предыдущих импульсов). Чтобы влияние предыдущих импульсов было не таким ощутимым, необходимо чтобы длина токового импульса превосходила длительность измерений в 100 и более раз.

Таб. 3.1 – Коэффициенты «занижения» переходных процессов из-за не бесконечности периода токовых импульсов.

t, доли периода	$U_{\text{изм}}/U_{\infty}$	t, доли периода	$U_{\text{изм}}/U_{\infty}$	t, доли периода	$U_{\text{изм}}/U_{\infty}$
0.0001	1.000	0.004	0.991	0.07	0.861
0.0004	0.999	0.007	0.984	0.1	0.812
0.0007	0.998	0.01	0.978	0.3	0.578
0.001	0.998	0.04	0.916	0.5	0.441

3.4 Первый этап

Одни из первых результатов измерений импульсных характеристик намагничивания образцов базальтов (1) показаны на рисунке 3.4 а. Начальное время измерений t_1 определялось собственной переходной характеристикой катушек и в рассматриваемом случае составляло 0.1 – 0.2 мс. Конечное время измерений t_2 зависело от силы тока в генераторной обмотке и уровня помех. Для данных, представленных на рисунке 3.4 а, $t_2 \approx 100 - 300$ мс. Таким образом, временной диапазон измерений $t_1 - t_2$ перекрывал три порядка. При измерении импульсной характеристики образцов с сильными проявлениями магнитной вязкости этот диапазон был шире, чем при изучении слабомагнитных образцов.

Для всех образцов приведенная к току ЭДС $e(t)/I$, индуцируемая в приемной катушке, описывалась степенной зависимостью

$$\frac{e(t)}{I} = a \cdot t^{-b}, \quad (3.4)$$

где $b \approx 1$. Такой характер убывания ЭДС не может быть следствием затухания вихревых токов или вызванной поляризацией [Кожевников, Снопков, 1995] и с большой вероятностью свидетельствует о том, что переходный процесс порождается релаксацией намагниченности суперпарамагнитных частиц [Кожевников, Антонов, 2008].

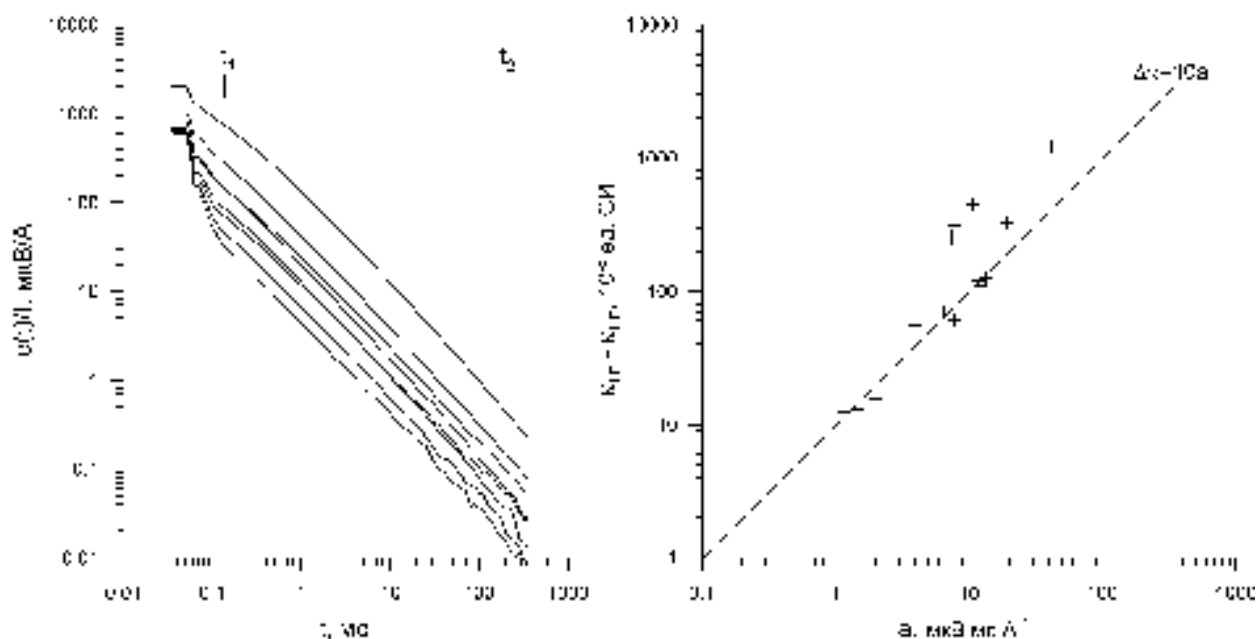


Рисунок 3.4 – Импульсные характеристики намагниченности образцов базальтов(1) (а); корреляция между результатами измерений во временной и частотной областях (б).

Для оценки погрешности измерений импульсных характеристик проведены исследования повторяемости результата. Образцы измерялись много раз в разные дни, и вычислялось относительное среднеквадратичное отклонение импульсных характеристик от среднего значения. Для образцов с сильными и средними проявлениями магнитной вязкости оно составило 2-4% во временном диапазоне $t_1 - t_2$. Для образцов со слабыми проявлениями магнитной вязкости шумы оказывали заметное влияние и на ранних временах, а среднеквадратичное отклонение сигнала выросло до 5-7%.

На рисунке 3.4 б показано сравнение результатов изучения магнитной вязкости во временной и частотной областях. Результаты измерений магнитной вязкости базальтов (1) показаны крестиками на графиках, где по осям координат отложены соответствующие значения a и $\Delta\kappa$. Как можно видеть, между этими параметрами наблюдается линейная корреляция: большинство экспериментальных точек располагаются вблизи прямой $\Delta\kappa=10 \cdot a$, показанной на рисунке 3.4 б штриховой линией [Камнев и др., 2015].

Если принять распределение суперпарамагнитных частиц приближением Фрелиха, то параметр $\Delta\kappa$ будет пропорционален содержанию СПМ зёрен. Как можно видеть, аналогичная пропорциональность имеет место

и для параметра a , который, таким образом, также может использоваться для оценки содержания СПМ зёрен. Согласно приведённым на рисунке 3.4 а импульсным характеристикам, в группе изученных образцов содержание частиц изменяется примерно в 30 раз. С другой стороны, из результатов сравнения видно, что частотно-зависимая магнитная восприимчивость может использоваться при интерпретации данных МПП, полученных в районах, где отмечаются проявления магнитной вязкости.

3.5 Второй этап

Первый опыт измерения импульсных характеристик намагниченности продемонстрировал их связь с параметрами, описывающими магнитную вязкость в частотной области. Вместе с тем, он выявил и некоторые проблемы. Система близко расположенных многовитковых катушек имела длительный (≈ 1 мс) собственный переходный процесс. При изучении образцов с сильными или умеренными проявлениями магнитной вязкости это не создавало проблем, так как полезный сигнал значительно превышал собственный отклик системы. На поздних временах ЭДС переходного процесса удавалось зарегистрировать до временных задержек порядка 200-300 мс, т.е. диапазон времён регистрации перекрывал около трёх порядков. Однако при изучении слабомагнитных образцов уже на временах менее 0.5 – 1 мс полезный сигнал невозможно было измерить на фоне собственной импульсной характеристики катушек, а на временах > 2 мс сигнал падал до уровня шумов.

Проблема снижения инерционности катушек и, соответственно, начального или минимального времени регистрации особенно актуальна при измерении переходных характеристик кубических образцов небольшого (2 см х 2 см х 2 см) размера, которые являются стандартными при палеомагнитных исследованиях. Для работы с такими образцами была изготовлена катушка кубической формы (100 витков в генераторной и приёмной обмотках, резонансная частота 1.19 МГц), которая, как и та, что использовалась при

изучении образцов базальтов цилиндрической формы, плотно облегла образец для максимального потокосцепления. Но переходный процесс большинства образцов уже на ранних временах (первые миллисекунды) был слабо различим на фоне шумов системы и внешних помех. Попытки уменьшить длительность собственного переходного процесса путём разнесения генераторной и измерительной обмоток не дали результатов, так как вместе с уменьшением связи между обмотками уменьшалось потокосцепление катушек с образцом. При увеличении силы тока в генераторной катушке, а также продолжительности измерений (многократная регистрация с целью последующего усреднения большого числа реализаций переходного процесса) образец нагревался от генераторной обмотки, что приводило к неконтролируемому дрейфу сигнала. Напомним, что при измерениях в частотной области изменение температуры образца всего на несколько градусов приводило к ощутимым изменениям его магнитной восприимчивости (см. главу 2.4.1).

Лучших результатов удалось добиться за счет изменения геометрии измерительной системы. Как и раньше, приёмная катушка плотно облегла образец (200 витков, резонансная частота 950 кГц), однако – в отличие от предшествовавших версий – помещается внутри генераторной катушки большего размера (200 витков, резонансная частота 320 кГц). Взаимная индуктивность генераторной и приёмной катушек равна 0.4 мГн. Катушки располагаются на подставке таким образом, что в зазор между ними поступает воздух, который циркулируя, не успевает нагреваться (Рисунок 3.5). Поэтому увеличение тока в генераторной катушке и длительности цикла измерений не приводит к нагреву образца. Кроме того, при такой конструкции уменьшается прямая связь между генераторной и приёмной катушками и, соответственно, длительность собственного переходного процесса системы.

Другая проблема измерения индукционных импульсных характеристик образцов связана с влиянием высокочастотных помех в диапазоне 100 кГц – 3 МГц. Для снижения их влияния параллельно измерительной обмотке

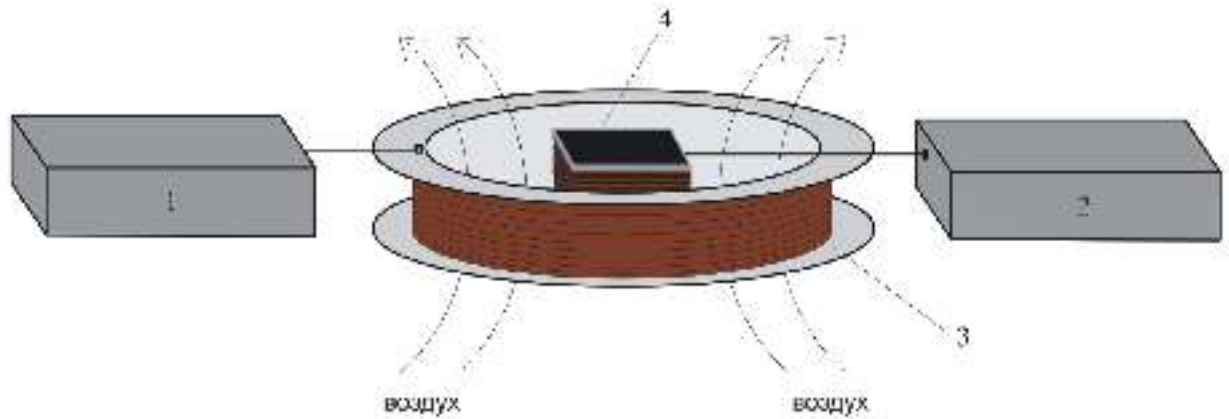


Рисунок 3.5 – Схематическое изображение лабораторной установки для измерения импульсных характеристик намагниченности кубических образцов: 1 – генератор прямоугольных импульсов тока; 2 – измеритель; 3 – генераторная катушка; 4 – измерительная катушка.

подключался резистор, действующий аналогично НЧ фильтру, полоса пропускания которого тем уже, чем меньше сопротивление резистора. При измерениях на поздних временах сопротивление шунта составляло 100 Ом [Камнев и др., 2013 а, б, в]. Хотя шунт с таким низким сопротивлением приводил к затягиванию собственного переходного процесса катушечной системы, в лабораторных условиях этот процесс стабилен, что позволило, измерив его при пустой катушке, вычесть из суммарной импульсной характеристики и, таким образом, найти полезный сигнал (Рисунок 3.6). При измерении на ранних временах сопротивление резистора составляло 800 Ом, что в сочетании с малым (≈ 0.4 А) током в генераторной катушке позволило снизить длительность собственного переходного процесса измерительной системы до нескольких десятков микросекунд.

Благодаря перечисленным методическим приёмам удалось изучить импульсные характеристики сильномагнитных кубических образцов в диапазоне от 60 мкс до 370 мс, средне- и слабомагнитных – от 1 мс до 10 мс. Чувствительность лабораторной установки возросла, несмотря на значительное уменьшение количества образца (по сравнению с цилиндрической формой). Усовершенствованная катушечная измерительная система вкупе с новыми методическими приёмами позволила получить

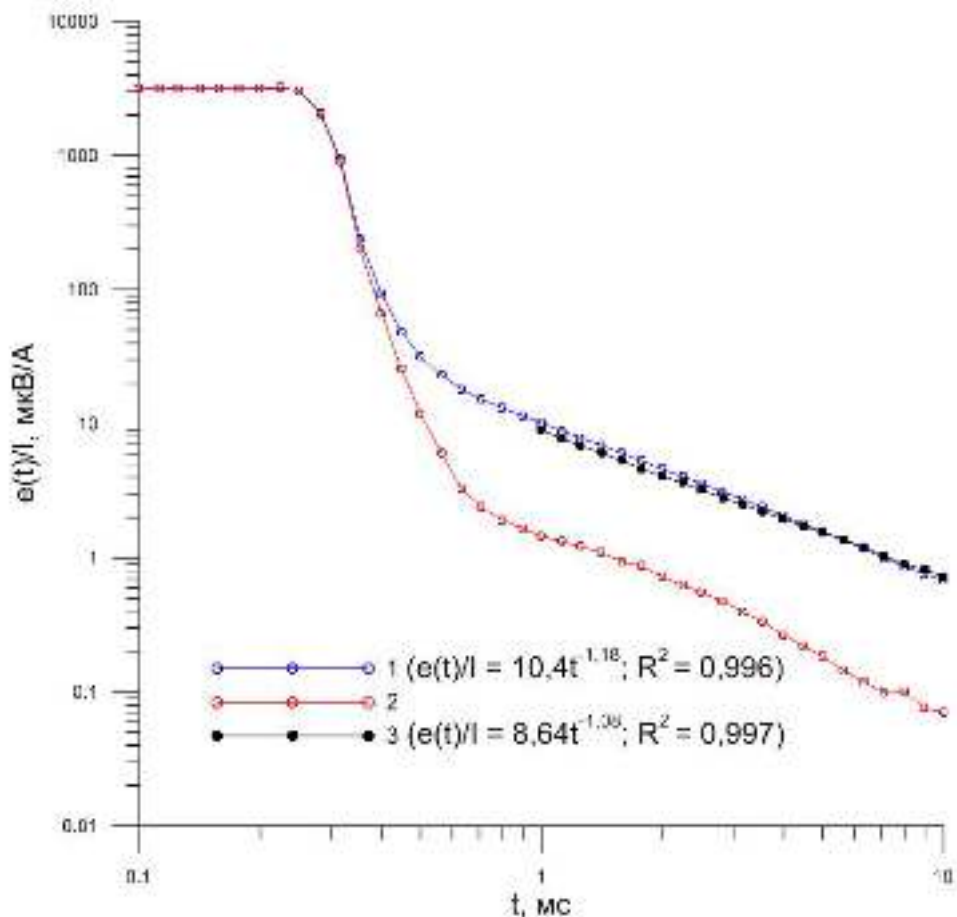


Рисунок 3.6 – Импульсные характеристики намагниченности: 1 – измеренная на образце; 2 – собственная переходная характеристика измерительной системы без образца; 3 – итоговая рассчитанная переходная характеристика.

уверенные переходные процессы даже тех образцов керна, которые при измерениях цилиндрической катушкой сложно было различить на фоне шумов.

На рисунке 3.7 приведены типичные результаты измерений импульсных характеристик намагниченности образцов горна (см. главу 2.2.3), полученные с помощью усовершенствованной методики. Для импульсных характеристик приведены аппроксимирующие их степенные зависимости, а также погрешности определения параметров a и b , найденные известным способом [Сквайрс, 1971] с учетом погрешности измерений. Результаты измерений всех импульсных характеристик намагниченности приведены в приложениях А, Б, В, Г, Д, Е.

Рисунок 3.8 иллюстрирует связь между результатами измерений магнитной вязкости с помощью усовершенствованной методики во временной области с параметром Δk , полученным в частотной области. Измерения

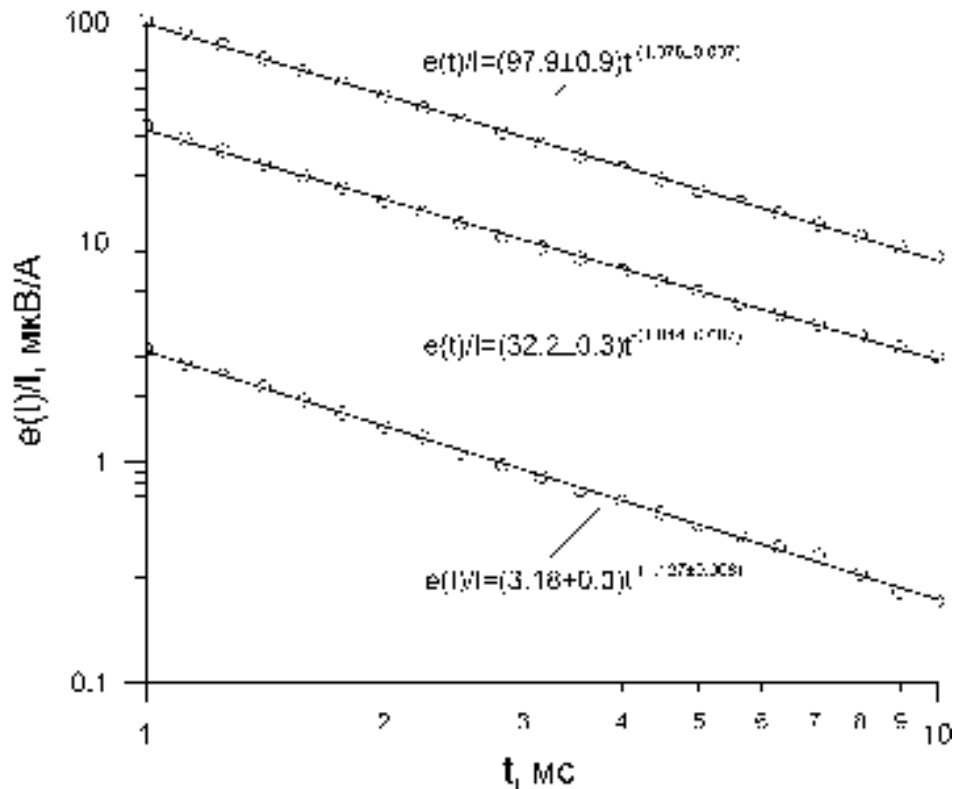


Рисунок 3.7 – Импульсные характеристики намагниченности кубических образцов из стенки древнего сыроступного горна в Приольхонье.

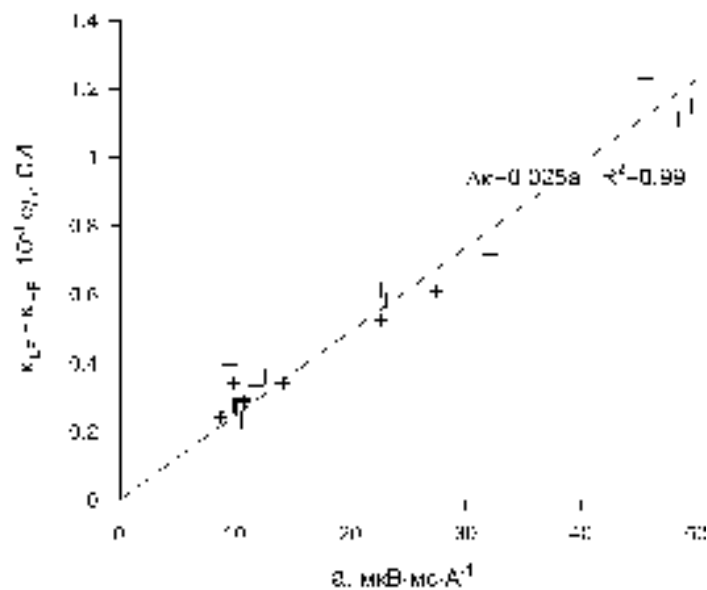


Рисунок 3.8 – Корреляция между результатами измерений во временной и частотной областях кубических образцов, выпиленных из стенок древнего сыроступного горна в Приольхонье.

магнитной восприимчивости на частотах $f_1 = 976$ Гц, $f_2 = 3904$ Гц выполнены с помощью прибора MFK1 Kappabridge [Pokorný et al., 2006, 2011] в палеомагнитном центре ИНГГ СО РАН (см. главу 2). Как и при изучении образцов базальтов Амалатского плато (см. рисунок 3.4), между параметрами a и $\Delta\kappa = \kappa_1 - \kappa_2$ наблюдается линейная корреляция, что свидетельствует о возможности применения импульсных индукционных систем для изучения магнитной вязкости небольших стандартных кубических образцов.

3.6 Сравнение катушек

По мере развития методики измерений различные образцы измерялись разными катушечными системами, и чтобы иметь возможность их сравнивать, необходимо понять, как соотносятся измерения с использованием различных катушек. Исходя из физики явления и закона Фарадея, результаты измерений образцов с использованием различных катушечных систем должны отличаться на постоянный коэффициент, зависящий только от геометрии катушек и количества витков обмотки, и не должны зависеть от образца. Однако измерительная система состоит из множества элементов, которые могут влиять на результаты измерений, поэтому зависимость результатов от измерительной катушки проверялась экспериментально. На рисунке 3.9 изображена амплитуда импульсных характеристик при $t = 1$ мс наиболее сильных образцов керна базальтов (1), измеренных различными катушечными системами. Ось абсцисс соответствует результатам измерений кубический образцов катушечной системой (кубическая измерительная катушка внутри цилиндрической генераторной), а ось ординат – результатам измерений цилиндрических образцов в цилиндрической катушке. Как видно из рисунка, между результатами измерений наблюдается линейная зависимость с коэффициентом 1.65. Таким образом не важно с помощью какой катушечной

системы проведены измерения, всегда можно найти коэффициент пропорциональности результатов.

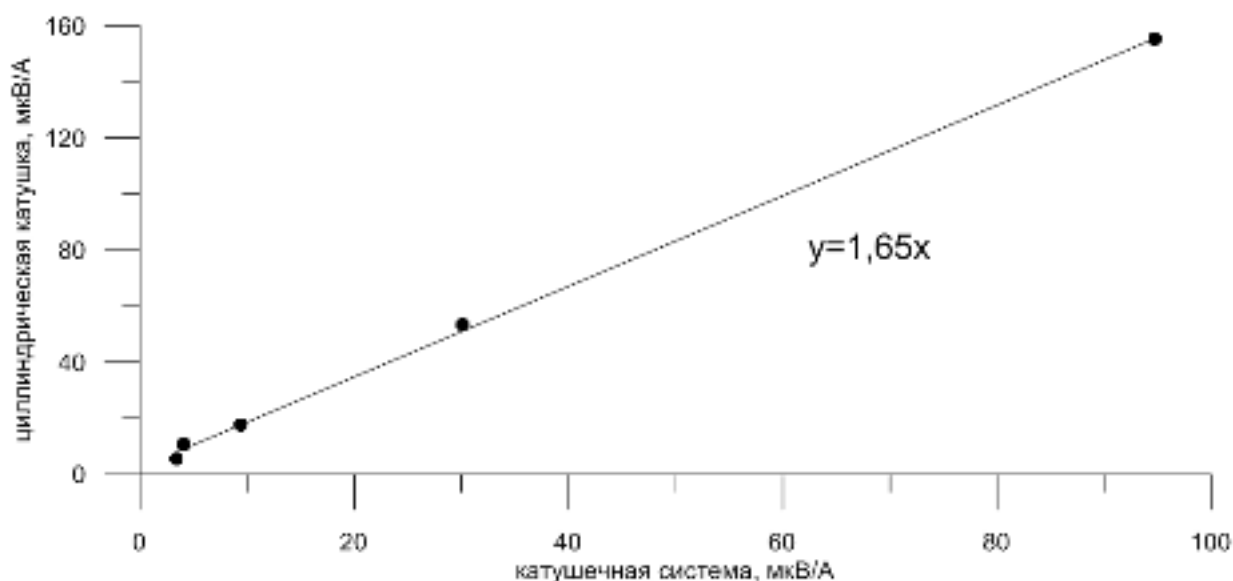


Рисунок 3.9 – Сравнение результатов измерения образцов керна базальтов различными катушечными системами. Ось абсцисс отражает результаты измерений кубический образцов катушечной системой (кубическая измерительная катушка внутри цилиндрической генераторной), а ось ординат – результаты измерений цилиндрических образцов в цилиндрической катушке. Сплошной линией изображена аппроксимирующая линейная функция.

3.5 Обсуждение результатов измерений

Из результатов измерения магнитной вязкости во временной области видно, что импульсные характеристики отличаются как амплитудой a , так и показателем степени b . Можно предположить, что различия по амплитуде отражают преимущественно различное содержание суперпарамагнитных частиц в образцах, тогда как показателя степени b – особенности распределения частиц по размерам.

Результаты изучения магнитной вязкости серии образцов во временной и частотной области показали, что между параметрами a и $\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$ наблюдается линейная корреляция. Но есть и отклонения, иногда даже значительные. Частично эти отклонения можно объяснить погрешностью измерений, как было описано во второй главе они могут быть значительными

при измерениях слабо магнитовязких образцов. Однако, можно предположить, что эти отклонения связаны с тем, что лабораторная индукционная установка обладает достаточной чувствительностью, чтобы увидеть отличие распределения частиц от приближения Фрёлиха. Это подтверждается ещё одним фактом. Согласно (3.5), ЭДС $e(t)$ в приёмной катушке должен убывать обратно пропорционально времени (при распределении частиц по функции Фрёлиха), т.е. показатель степени b в выражении (3.4) должен быть равен единице [Кожевников, Антонов, 2008]. Экспериментальные же данные говорят о том, что b отличается от единицы, причем это отличие больше погрешности определения этого параметра. Импульсные характеристики различных образцов характеризуются различными показателями степени аппроксимирующей степенной функции (см. рисунок 3.7).

Импульсные характеристики некоторых образцов на различных временных интервалах аппроксимируются различными степенными функциями. На рисунке 3.10 приведён переходный процесс образца №1 африканского песка (см. главу 2). Из рисунка видно, что на каждом из трёх временных интервалов импульсная характеристика аппроксимируется своей

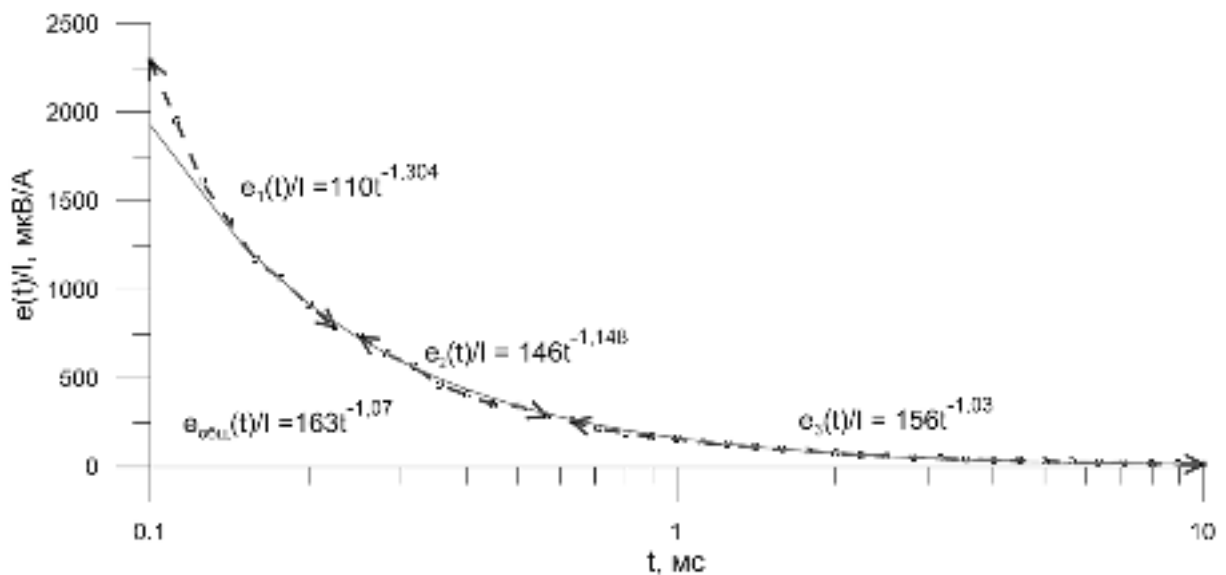


Рисунок 3.10 – Импульсная характеристика образца №1 африканского песка, разделённый на три временных интервала (штриховыми линиями). Сплошной линией изображена степенная функция, аппроксимирующая всю переходную характеристику. Для аппроксимаций всего переходного процесса и каждого участка отдельно приведена формула степенной функции.

степенной функцией (различия в параметрах превышают погрешности аппроксимации). Описывать такие экспериментальные данные одной степенной функцией некорректно, на рисунке явно видны сильные расхождения на ранних временах. Таким образом, приближение Фрёлиха не подходит для описания распределения размеров магнитных частиц таких образцов.

3.6 Выводы

Релаксация намагниченности ультрадисперсных зерен ферромагнитных минералов оказывает заметное, а иногда преобладающее влияние на измеренные в лаборатории и в поле импульсные характеристики намагниченности. По сравнению с частотными методами исследование импульсных характеристик намагниченности имеет те преимущества, что проявления магнитной вязкости наблюдаются в отсутствие первичного поля, а измерения проводятся в широком временном диапазоне. Это позволяет снизить погрешность определения параметров, характеризующих магнитную вязкость. В отличие от переходной характеристики, ее производная, т.е. импульсная характеристика, свободна от влияния стабильной компоненты остаточной намагниченности. Это снимает проблему, связанную с неопределенностью при выделении небольшой по величине вязкой компоненты из суммарной намагниченности.

Временной спад импульсных характеристик намагниченности чаще всего можно описывать степенной функцией $a \cdot t^{-b}$, где a – начальное значение (изменяется в широком диапазоне), b – показатель степени, близкий к единице.

Как показали измерения на образцах, выполненные с помощью индукционных катушечных систем, параметр a демонстрирует сильную линейную корреляцию с частотно-зависимой магнитной восприимчивостью $\Delta\kappa$, которая традиционно используется для оценки содержания суперпарамагнитных частиц. Это даёт основания полагать, что импульсные

индукционные системы могут найти применение для экспрессного изучения большого количества образцов с целью диагностики присутствия SP частиц и оценки их содержания.

Глава 4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧЕННОСТИ

Разработанная индукционная установка даёт возможность исследовать переходные процессы, связанные с релаксацией намагниченности суперпарамагнитных частиц. Для описания получаемых импульсных характеристик намагниченности обычно использовалась степенная функция at^{-b} . Различные образцы имели разную амплитуду a и показатель степени b , причём отклонения показателя степени b от единицы превышали погрешности его определения. Для некоторых образцов импульсные характеристики намагниченности описывались разными степенными функциями, в зависимости от временного интервала аппроксимации. Поэтому можно заключить, что приближение распределения частиц по размерам функцией Фрёлиха далеко не всегда применимо для описания результатов измерений магнитной вязкости во временной области.

При выборе более подходящей модели, на основе которой можно было бы давать интерпретацию импульсных характеристик использовалась литература по магнитной гранулометрии, согласно которой, распределение объемов частиц в геологических средах близко к логнормальному [Kodama, 2013; Liu et al., 2005; Worm, 1999; Eyre, 1997; Banerjee et al., 1993]. Напомним, что плотность вероятности для логнормального распределения описывается как (1.13):

$$P(V, V_m, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma V} \exp \left[-\frac{(\ln V - \ln V_m)^2}{2\sigma^2} \right],$$

где V_m – средний объем, σ – среднеквадратичное отклонение логарифмов объёмов. Для проверки пригодности такой функции распределения при описании результатов измерений магнитной вязкости во временной области было проведено математическое моделирование импульсных характеристик намагниченности.

4.1 Математическое моделирование импульсных характеристик намагниченности при различных параметрах распределения размеров частиц

Лабораторная установка измеряет ЭДС, индуцируемую в измерительной катушке изменяющимся магнитным потоком вследствие релаксации намагниченности образца. Чтобы результаты моделирования не были «привязаны» к какой-то конкретной измерительной системе и/или образцу, т.е. носили более общий характер, вместо ЭДС рассчитывалась производная вязкой остаточной намагниченности $J_r(t)$ ансамбля однодоменных частиц с логнормальным распределением объемов. $J_r(t)$ вычислялось по формуле [Wang et al., 2010]:

$$J_r(t) = \frac{\int_0^\infty J_0 \exp[-t/\tau(V)] VP(V) dV}{\int_0^\infty VP(V) dV},$$

$$\tau(V) = \tau_0 \exp\left(\frac{\mu_0 H_k J_s V}{kT}\right),$$

где J_0 – начальная (т.е. в момент, когда выключается намагничивающее поле) намагниченность. При расчете τ использовались параметры для магнетита: $\mu_0 H_k = 25$ мТ, $J_s = 478$ кА/м [Dunlop and Özdemir, 1997]. Предполагалось, что $T = 293$ °К, что соответствует комнатной температуре. Также было принято, что начальная намагниченность J_0 и суммарный объем частиц, определяемый интегралом в знаменателе, равны единице; значения ЭДС при этом получаются в условных единицах.

В верхней части рисунка 4.1 а показаны три распределения $f(V)$, описываемые выражением (4.1). Они имеют одно и то же среднеквадратичное отклонение ($\sigma = 0.8$), однако разный средний объем: $V_m = 2 \cdot 10^{-24}$, $4 \cdot 10^{-24}$ и $8 \cdot 10^{-24}$ м³. На рисунке 4.1 а приведены соответствующие импульсные характеристики. Влияние среднеквадратичного отклонения иллюстрирует рисунок 4.1 б. Здесь вверху приведены графики распределений, характеризующихся одним и тем же средним объемом ($V_m = 4 \cdot 10^{-24}$ м³), но разным среднеквадратичным отклонением ($\sigma = 0.6, 0.8$ и 1.0). Импульсные

характеристики намагниченности показаны в нижней части рисунка 4.1 б. Параметры распределения, а также степенной зависимости, аппроксимирующей импульсные характеристики, объединены в таблицу 4.1.

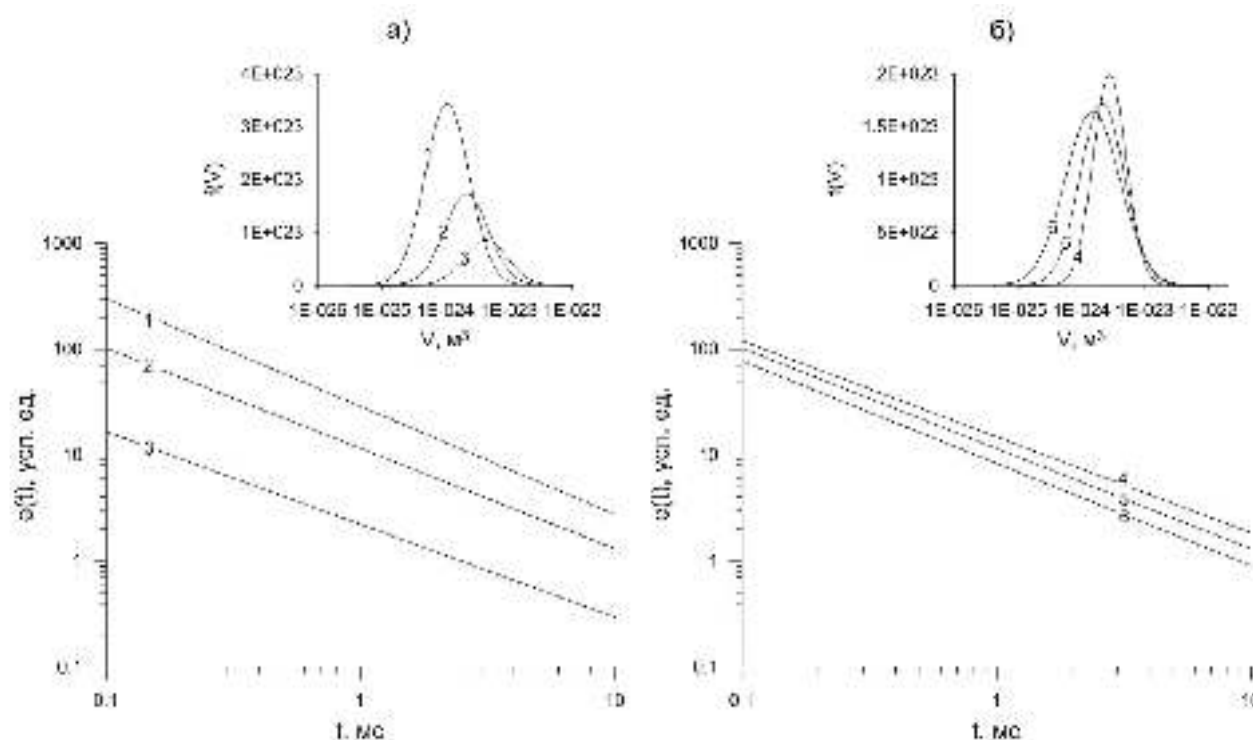


Рисунок 4.1 – Влияние параметров V_m (а) и σ (б) логнормального распределения объемов однодоменных частиц на импульсные характеристики намагниченности.

Таблица 4.1 – Параметры распределения и степенной зависимости, аппроксимирующей соответствующую импульсную характеристику.

Распределение, №	$V_m, 10^{-24} \text{ м}^3$	σ	a	b
1	2	0.8	33.2	1.10
2, 5	4	0.8	29.5	1.02
3	8	0.8	12.5	0.95
4	4	0.6	44	1.04
6	4	1.0	20	1.01

Представленные на рисунке 4.1 распределения объемов далеки от равномерного (которое, если перейти к τ , эквивалентно распределению Фрëлиха). Однако спад ЭДС, описываемый степенной зависимостью $a \cdot t^{-b}$ с показателем степени b аппроксимирующей функции близким к единице, очень схож с ЭДС индуцируемой ансамблем частиц с распределением Фрëлиха [Камнев и др., 2014].

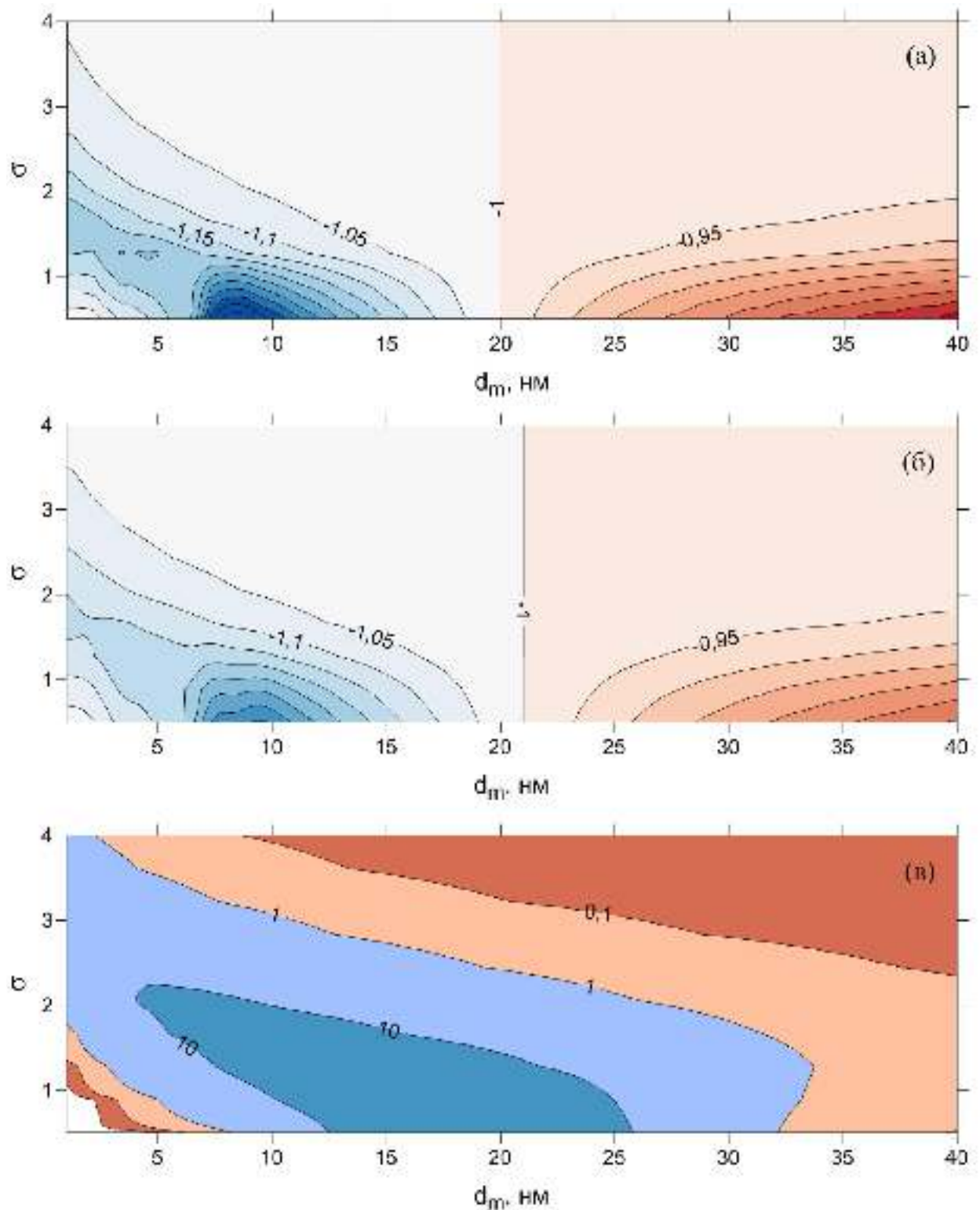


Рисунок 4.2 – Карты значений показателя степени (а,б) и амплитуды (в) степенных функций, аппроксимирующих модельные импульсные характеристики намагниченности в зависимости от различных параметров логнормального распределения объёмов частиц (σ , d_m). Аппроксимации проводились в двух временных диапазонах. На рисунке (а) представлены значения показателя степени при аппроксимации во временном диапазоне от 100 мкс до 1 мс. На рисунках (б, в) представлены значения показателя степени и амплитуды соответственно при аппроксимации во временном диапазоне от 1 мс до 10 мс.

Если бы такие данные были бы получены в поле или лаборатории, то отличие показателя степени от единицы можно было бы отнести к влиянию погрешности измерений.

На рисунке 4.2 изображены параметры степенных функций, аппроксимирующих модельные импульсные характеристики намагниченности при различных параметрах логнормального распределения объёмов магнитных частиц σ , V_m (в большинстве публикаций размеры частиц представляются их диаметром, поэтому здесь и далее вместо среднего объёма V_m приводится диаметр частицы среднего объёма d_m). Аппроксимация проводилась в двух временных диапазонах: 100 мкс – 1 мс и 1 мс – 10 мс. Из рисунков 4.2 а, б видно, что в различных временных диапазонах модельные импульсные характеристики аппроксимируются разными степенными функциями. Подобное поведение наблюдалось и у экспериментально полученных импульсных характеристик намагниченности.

Модельные импульсные характеристики намагниченности по форме схожи с получаемыми экспериментально. Это обстоятельство свидетельствует о возможности описания импульсных характеристик намагниченности в рамках модели логнормального распределения по размерам мелких магнитных частиц.

Результаты математического моделирования также показали (Рисунок 4.2 в), что от параметров распределения объёмов частиц (σ , d_m) зависит амплитуда импульсной характеристики. Полученные результаты можно использовать для оценки чувствительности лабораторной установки к распределениям частиц с различными параметрами. Как видно из рисунка 4.2 в лабораторная установка более чувствительна к узким распределениям ($\sigma < 2$) с диаметром частиц среднего объёма d_m в диапазоне от 10 нм до 25 нм. Исходя из того, что различие по амплитуде полученных экспериментально импульсных характеристик составляет примерно два порядка, можно условно обозначить область чувствительности лабораторной установки «синей» областью на рисунке 4.2 в.

4.2 Инверсия синтетических импульсных характеристик

Используя модель логнормального распределения частиц, были смоделированы различные импульсные характеристики намагниченности. Следующий шаг заключался в попытке восстановить параметры распределения σ и V_m модельных импульсных характеристик. Для решения обратной задачи была написана программа на языке Matlab. При определении параметров минимизировалась целевая функция:

$$F = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left\{ \left[\frac{u(t_n)}{u(t_1)} - \frac{v(t_n)}{v(t_1)} \right] / \frac{u(t_n)}{u(t_1)} \right\}^2}, \quad (4.1)$$

где $u(t)$ – синтетическая импульсная характеристика, а $v(t)$ – импульсная характеристика, рассчитанная при заданных параметрах σ и V_m . В таком представлении целевая функция реагирует только на форму импульсной характеристики, а не на амплитуду. Нормирование на начальную амплитуду необходимо, потому что она зависит не только от параметров распределения, но и от суммарного объёма частиц, параметров намагничивающего поля, геометрии генераторно-измерительной системы и т.д.. Однако, зная параметры функции распределения σ и V_m , и эмпирически определив константы, связанные с измерительной установкой, из начальной амплитуды можно рассчитать суммарный объём частиц.

Написанная программа для решения обратной задачи однозначно определяла параметры σ и V_m модельных кривых. Однако реальные переходные процессы осложнены случайными шумами. От этих шумов зависит погрешность определения параметров распределения. Для того чтобы оценить возможности восстановления параметров зашумлённых импульсных характеристик, была проведена серия численных экспериментов.

При лабораторных измерениях импульсных характеристик намагниченности было установлено, что относительное среднеквадратичное отклонение измеряемых сигналов составляет примерно 2-7% в зависимости от амплитуды (a). Важно отметить, что часть (для сильномагнитных образцов

значительная) этой погрешности приходится на дрейф импульсной характеристики. При этом, поскольку подбирается только форма сигнала, на решение обратной задачи влияет только погрешность, вносимая случайными шумами.

Сначала была предпринята попытка подобрать параметры модельной импульсной характеристики с параметрами $\sigma = 1$ и $V_m = 2.4 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ (что соответствует частице с $d_m = 20 \text{ нм}$), на которую наложен нормальный шум с $\sigma_{\text{ш}} = 3\%$. Временной диапазон был выбран от 1 мс до 10 мс, в нём почти для всех измеренных образцов удавалось зарегистрировать стабильный переходный процесс на порядок выше уровня шумов. Для отыскания оптимального решения строилась карта целевой функции (Рисунок 4.3 а).

На рисунке видно, что область минимума целевой функции растянулась от «истинных» параметров до граничных значений параметров σ и d_m . Значения целевой функцией внутри этой границы порядка погрешности, вносимой шумами. Очевидно, что при 3% нормальном шуме можно оценить область возможных значений параметров модельной импульсной характеристики, однако она довольно большая, и почти перекрывает всю предполагаемую чувствительность лабораторной установки. Уменьшение уровня шумов до 1% несколько сужает область возможных решений (Рисунок 4.3 б), однако она всё равно остаётся сильно вытянутой, и содержит большое множество возможных комбинаций параметров начального распределения.

Импульсные характеристики намагниченности ансамблей частиц с параметрами распределения внутри этой «синей» окрестности незначительно отличаются друг от друга. Как показало моделирование, для того чтобы различить параметры распределения, необходимо измерить импульсные характеристики намагниченности с очень высокой точностью, порядка 0.1%. Достичь такой точности измерения импульсных характеристик в лабораторных условиях пока не представляется возможным. Вместо этого был

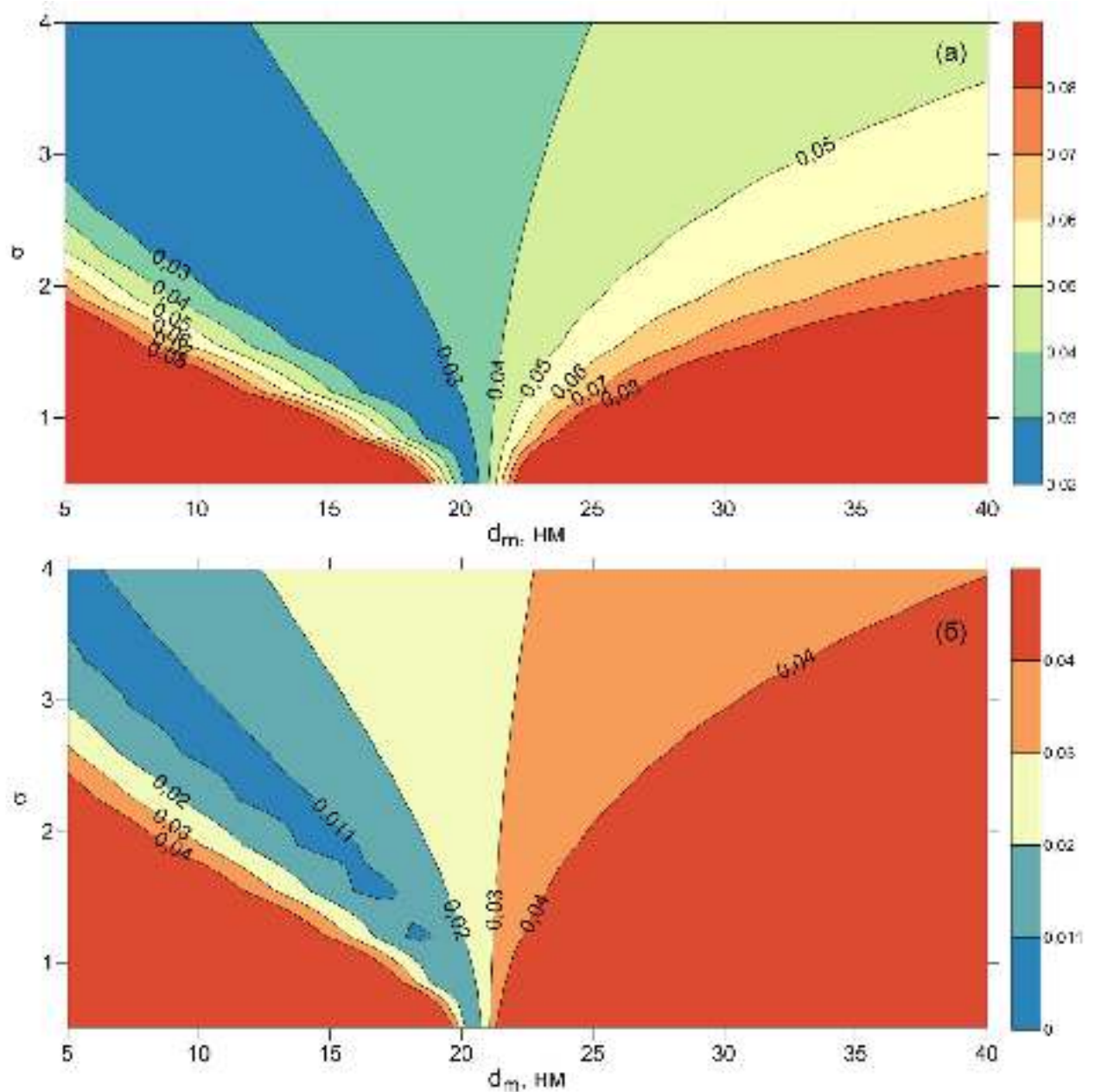


Рисунок 4.3 – Карта целевой функции (построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности с параметрами логнормального распределения $\sigma=1$, $d_m=20$ нм) рассчитанной во временном диапазоне 1 мс – 10 мс, с наложенным нормальным шумом с $\sigma_{ш}=3\%$ (а) и $\sigma_{ш}=1\%$ (б)

расширен временной диапазон расчёта модельных импульсных характеристик намагниченности: с 1 мс – 10 мс до 0.1 мс – 100 мс. В этом временном диапазоне лабораторная установка позволяет исследовать переходные процессы для образцов с высоким содержанием суперпарамагнитных частиц ($a > 20$). Карта целевой функции, построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности в расширенном временном диапазоне и наложенным нормальным шумом с $\sigma_{ш} = 1 - 3\%$, изображена на рисунке 4.4.

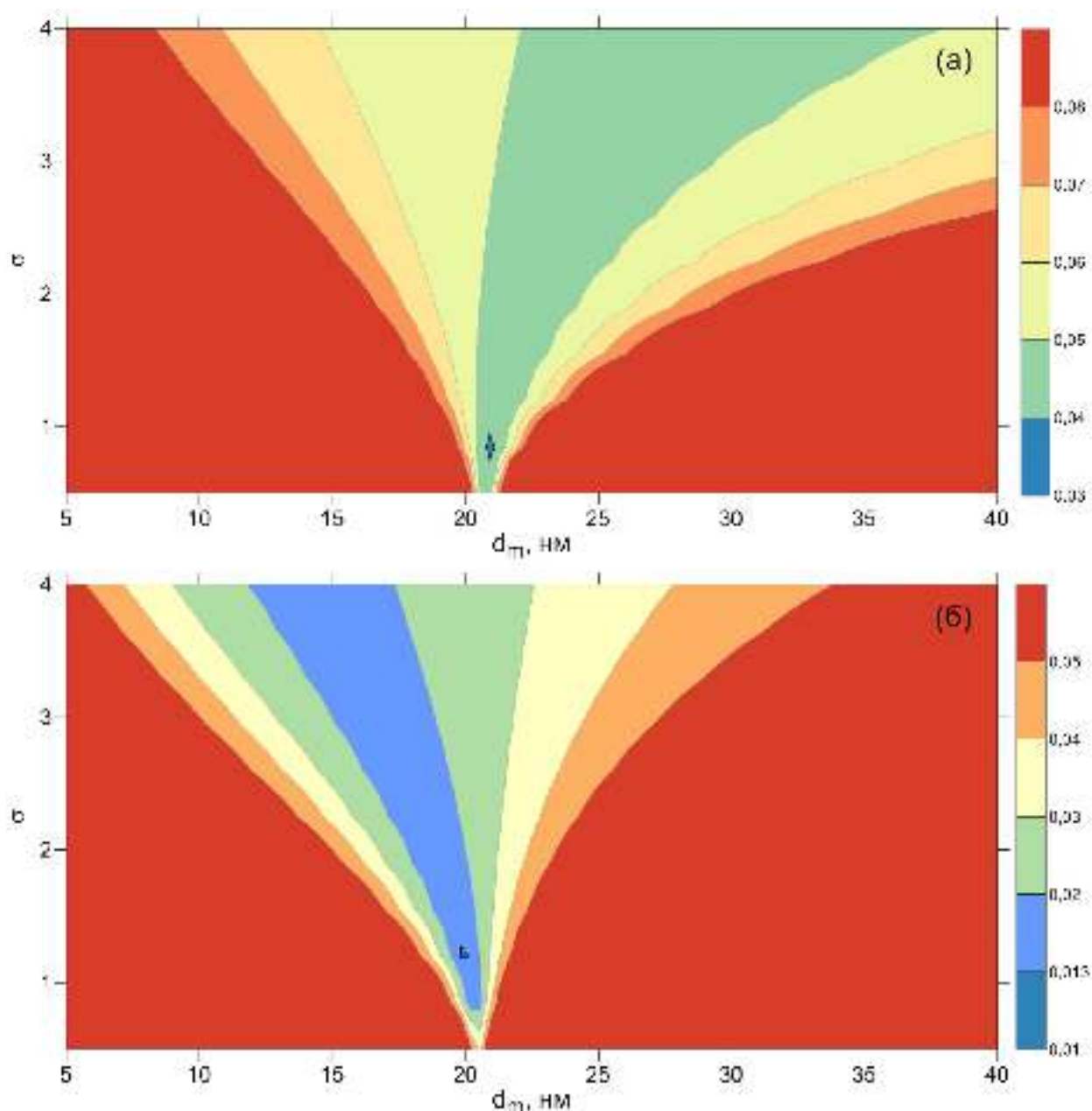


Рисунок 4.4 – Карта целевой функции (построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности с параметрами логнормального распределения $\sigma=1$, $d_m=20$ нм) рассчитанной во временном диапазоне 0.1 мс – 100 мс, с наложенным нормальным шумом с $\sigma_{ш}=3\%$ (а) и $\sigma_{ш}=1\%$ (б)

На картах целевой функции, рассчитанных для расширенного временного диапазона измерений, почти всегда имеется небольшая область минимума, находящаяся возле параметров изначального не зашумлённого переходного процесса. Область возможных значений становится уже и ближе к изначальным параметрам по мере уменьшения уровня нормального шума. Таким образом, для импульсных характеристик намагниченности смоделированных во временном диапазоне 0.1 мс – 100 мс с наложенным

нормальным шумом $\sigma_{ш} = 1 - 3\%$ картируется небольшая область возможных параметров логнормального распределения размеров суперпарамагнитных частиц, близкая к параметрам (или включающая их) изначальной, не зашумлённой модельной импульсной характеристики намагниченности.

4.3 Оценка эффективности инверсии синтетических импульсных характеристик

Как уже отмечалось ранее, амплитуда и форма импульсной характеристики намагниченности зависит от параметров распределения объёмов частиц. Логично предположить, что при различных начальных параметрах распределения область возможных параметров, определённая по зашумлённым данным, будет тоже отличаться.

Для оценки погрешности решения обратной задачи проведён численный эксперимент. Была взята область параметров $\sigma \in [0.5; 4]$ $d_m \in [5; 30]$, которая покрывает большую часть зоны чувствительности экспериментальной установки. Внутри этой области для каждого набора параметров с шагом $\sigma = 0.01$ и $d_m = 0.1$ нм рассчитывались 500 импульсных характеристик с наложенным разным 1% и 5% нормальным шумом. Целевая функция минимизировалась с помощью алгоритма Нелдера-Мида [Nelder, 1965]. Начальная точка для поиска была выбрана с координатами $0.8 \cdot \sigma$ $1.2 \cdot d_m$, чтобы алгоритм подбора остановился на нижней границе области возможных решений. Полученный набор подобранных параметров использовался для статистической оценки их среднеквадратичного отклонения от начальных параметров. Результаты эксперимента приведены на рисунках 4.5, 4.6.

Из рисунка 4.5 видно, при низком уровне шума (1%) параметр d_m подбирается с погрешностью 10-20% практически на всей области параметров. Только при широких распределениях с малым d_m погрешность вырастает до 50-80%. Параметр σ тоже неплохо подбирается (с погрешностью

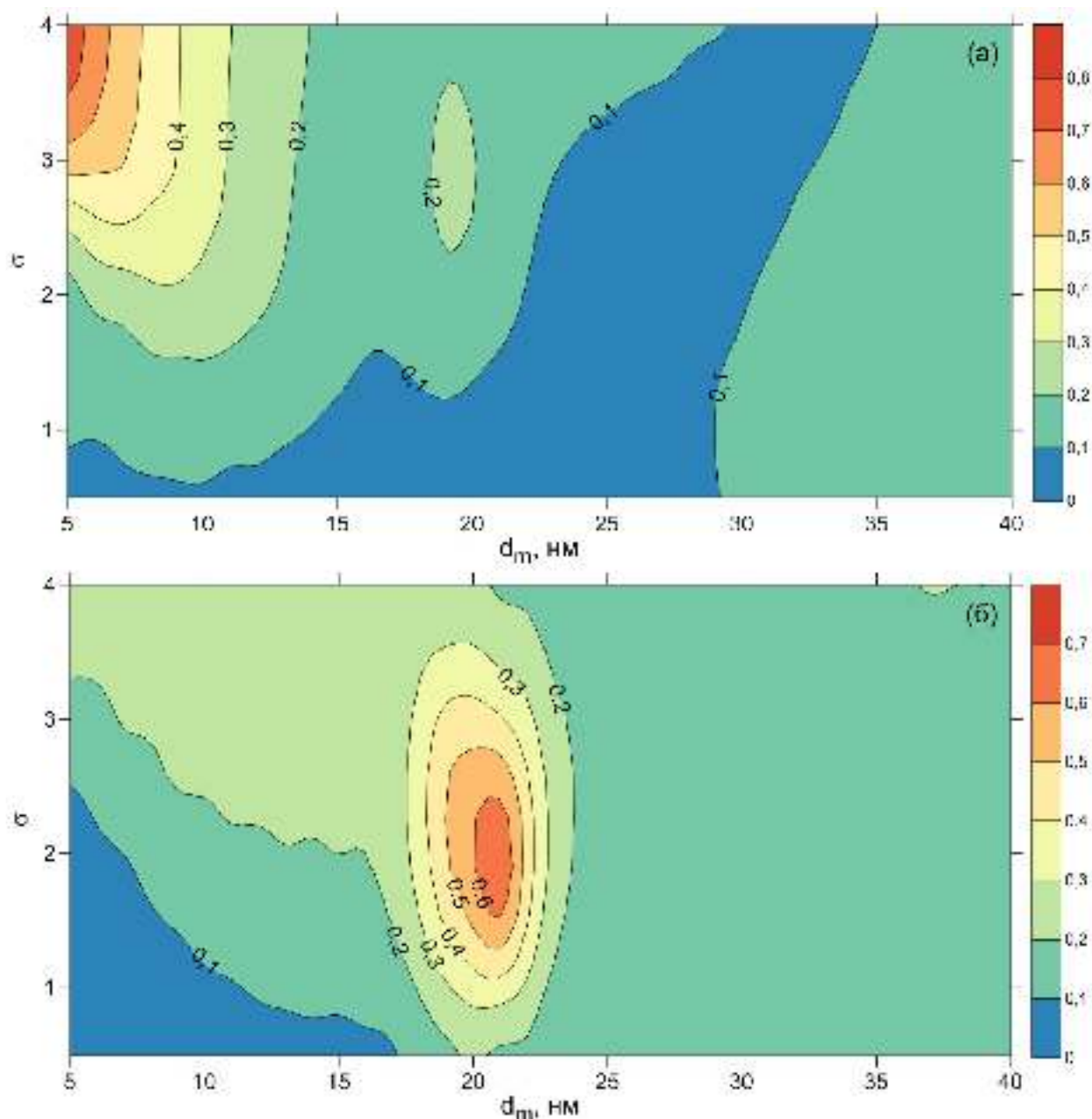


Рисунок 4.5 – Относительное среднее квадратичное отклонение подобранных значений d_m (а) и σ (б) логнормального распределения объёмов частиц. Инверсия проводилась на синтетических импульсных характеристиках с наложенным 1% нормальным шумом во временном диапазоне 0.1 мс – 100 мс.

10-20%) на большой области параметров, однако погрешность возрастает вблизи параметров $d_m = 22$ нм, $\sigma = 2$ и может составлять 60%.

На рисунке 4.6 видно, что при высоком уровне шумов (5%), среднее квадратичное отклонение подобранных параметров имеет схожее [с низким уровнем шумов] поведение, однако значения погрешностей значительно возрастают. Но всё же, в некоторых областях параметры

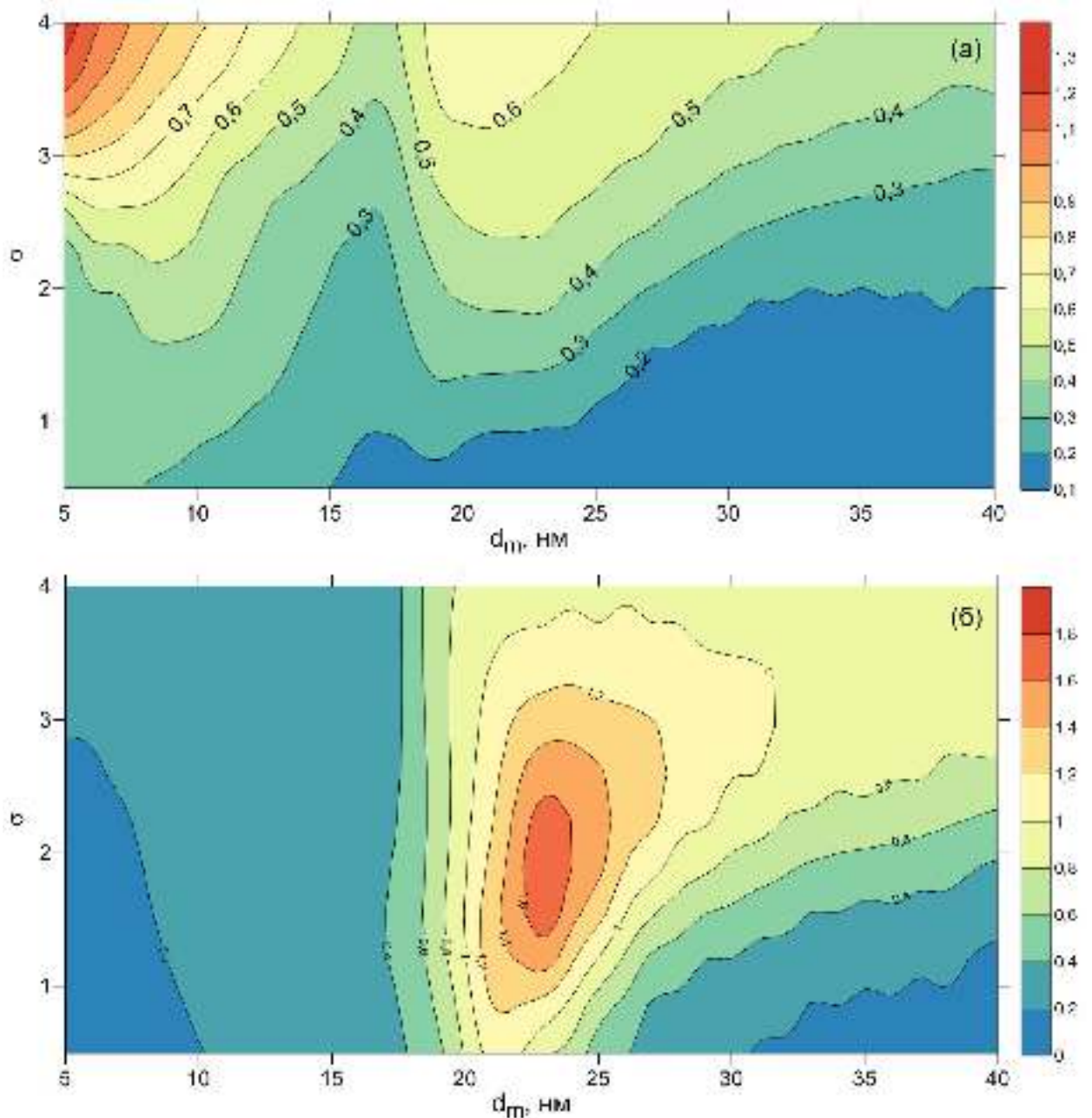


Рисунок 4.6 – Относительное среднеквадратичное отклонение подобранных значений d_m (а) и σ (б) логнормального распределения объёмов частиц. Инверсия проводилась на синтетических импульсных характеристиках с наложенным 5% нормальным шумом во временном диапазоне 0.1 мс – 100 мс.

изначального логнормального распределения подбираются с точностью порядка 20%.

Полученные результаты свидетельствуют, что при исследованиях во временном диапазоне 0.1 мс – 100 мс при низком уровне шумов можно восстанавливать значения начальных параметров модельного логнормального

распределения частиц с приемлемой погрешностью почти во всей области чувствительности лабораторной индукционной установки.

4.4 Выводы

Как показало математическое моделирование, импульсные характеристики длительностью от 1 мс до 10 мс при средней погрешности измерений могут быть использованы для определения области возможных значений параметров распределения. Импульсные характеристики длительностью от 0.1 мс до 100 мс позволяют получать более точные значения параметров σ и V_m со среднеквадратичным отклонением до 10-20%. Априорная информация о параметрах распределения и увеличение точности измерений может позволить существенно уменьшить погрешность определения параметров распределения магнитных частиц.

Таким образом, результаты исследований магнитной вязкости во временной области с помощью лабораторной установкой можно использовать для оценки параметров распределения магнитных частиц в рамках логнормальной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью метода исследования магнитной вязкости, основанного на измерении магнитной восприимчивости на нескольких частотах, создана референтная база параметров Δk и FD образцов природных и антропогенных сред.

Разработанная лабораторная индукционная установка показала высокую чувствительность и низкую погрешность измерений (по сравнению с измерениями в частотной области) импульсных характеристик намагниченности.

В результате анализа данных, полученных во временной и частотной областях установлено, что разработанная методика исследования магнитной вязкости во временной области позволяет проводить экспрессное изучение образцов с целью обнаружения суперпарамагнитных частиц и оценки их содержания.

Экспериментально показано, что индукционная установка для измерения импульсной характеристики намагниченности чувствительна к изменению распределения объёмов частиц. По сравнению с распределением Фрёлиха логнормальное распределение объёмов частиц лучше объясняет экспериментальные данные. Более того, некоторые полученные импульсные характеристики намагниченности не могут быть описаны степенной зависимостью, следующей из распределения Фрёлиха (см. Приложение Е.2).

С помощью математического моделирования установлено, что по импульсным характеристикам намагниченности можно восстанавливать параметры логнормального распределения частиц. С учётом определённой экспериментальной точности измерений были рассчитаны погрешности определения параметров распределения.

В перспективах развития лабораторной индукционной установки по исследованию магнитной вязкости совершенствование техники и методики

измерений, а также расширение набора образцов и количества представительных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антонов, Е. Ю. Импульсная индуктивная электроразведка геологических сред с магнитной вязкостью / Е. Ю. Антонов, Н. О. Кожевников, П. С. Максимов, В. В. Гомульский // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. Книга 2. – СПб.: СПбГУ, 2011. – С. 11 – 14.

Барсуков, П. О. Исследование окружающей среды методом переходных процессов с использованием ВП и СПМ эффектов / П. О. Барсуков, Э. Б. Файнберг // Физика Земли. – 2002. – №11. – С. 82-85.

Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник / С. И. Баскаков. – М.: Высш. Школа, 1983. – 536 с.

Большаков, В. А. Использование методов магнетизма горных пород при изучении новейших отложений / В. А. Большаков. – М.: Геос, 1996. – 192 с.

Великин, А. Б. О влиянии вмещающих горных пород в методе переходных процессов / А. Б. Великин // Метод переходных процессов при поисках месторождений сульфидных руд. – Л.: Недра, 1971. – с. 24 -35.

Захаркин, А. К. Тарло Н. Н. Магнитная вязкость горных пород – новый осложняющий фактор метода ЗСБ / А. К. Захаркин, В. М. Бубнов, В. А. Крыжановский, Н. Г. Полетаева // Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1988. – С. 19-26.

Казанский, А. Ю. Вклад магнитного последствия в индукционные переходные характеристики базальтов Витимского плато / А. Ю. Казанский, Г. Г. Матасова, Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов // Геофизический журнал. – №4. – Т.34. – 2012. – с. 128 – 136.

Камнев, Я. К. Измерение магнитной вязкости во временной области лабораторной индукционной установкой / Я. К. Камнев, Н. О. Кожевников, Г.Г. Матасова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр.,

10-20 апреля 2012 г., Новосибирск: VIII Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых»: сб. материалов в 2 т. Т. 1.- Новосибирск: СГГА, 2012. – с 38-43.

Камнев, Я. К. Усовершенствование методики измерения магнитной вязкости во временной области лабораторной индукционной установкой / Я. К. Камнев, Н. О. Кожевников, С. М. Стефаненко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр., 15–26 апреля 2013 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 3 т. Т.2. – Новосибирск: СГГА, 2013а. – С. 197 – 202.

Камнев, Я. К. Проблемы измерения магнитной вязкости во временной области и некоторые пути их решения [Электронный ресурс] / Я. К. Камнев, Н. О. Кожевников, С. М. Стефаненко // Материалы VI Всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013 (2-6 сентября 2013 года). – Новосибирск. – 2013б. – 3 с. – Режим доступа: <http://emf.ru/ems2013/section7/Камнев.pdf>, свободный.

Камнев, Я. К. Исследование магнитной вязкости во временной и частотной областях / Я. К. Камнев // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXV Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 23 – 28 апреля 2013 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2013в. – с. 150 – 151.

Камнев, Я. К. Первые результаты математического моделирования индукционных переходных характеристик магнитовязких геологических сред / Я. К. Камнев, Н. О. Кожевников, С. М. Стефаненко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных

ископаемых. Геозкология»: сб. материалов в 4 т. Т.2. – Новосибирск: СГГА. – 2014. – С. 101 – 105.

Камнев, Я. К. Импульсная характеристика вязкой намагниченности и ее измерение с помощью лабораторной индукционной установки / Я. К. Камнев, Н. О. Кожевников, А. Ю. Казанский, С. М. Стефаненко // Геология и геофизика. – 2015. – т. 56. – № 11. – С. 2076-2091.

Кожевников, Н. О. Суперпарамагнетизм в геоэлектрике / Н. О. Кожевников, С. В. Снопков // Иркутск, политехн. ин-т. 1990, 32с. Деп. в ВИНТИ 13.08.90, N 4584.

Кожевников, Н. О. Магнитная вязкость траппов и ее связь с аномалиями электромагнитного поля в методе переходных процессов (Якутская кимберлитовая провинция) геоэлектрике / Н. О. Кожевников, С. В. Снопков // Геология и геофизика. – 1995. – т. 36. – N 5. – С.91-102.

Кожевников, Н. О. Как поиски решения геофизической проблемы привели к открытию археологического памятника / Н. О. Кожевников, О. К. Кожевников, А. В. Харинский // Геофизика. – 1998. – №6. – с. 48-60.

Кожевников, Н. О. Магнитная вязкость обожженных глин и возможность ее использования при археологических изысканиях / Н. О. Кожевников, С. П. Никифоров // Российский геофизический журнал. – 1999. – №13 – 14. – С. 42 – 46.

Кожевников, Н. О. Влияние релаксации намагниченности однородного полупространства на индукционные переходные характеристики / Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов // Геология и геофизика. – 2008. – т. 49. – №3. – С. 262 – 276.

Кожевников, Н. О. Влияние релаксации намагниченности двухслойного полупространства на индукционные переходные характеристики / Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов // Геология и геофизика. – 2009. – т. 50. – №10. – С. 1157 – 1170.

Кожевников, Н. О. Влияние релаксации намагниченности горизонтального пласта на индукционные переходные характеристики / Н. О.

Кожевников, Е. Ю. Антонов // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 4. – С. 512 – 520.

Кожевников, Н. О. Метод переходных процессов при изучении геологических сред с магнитной вязкостью / Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов, Г. Г. Матасова, Я. К. Камнев // Геофизический журнал. – №4. – Т.34. – 2012. – С. 137 – 149.

Кожевников, Н. О. Анализ погрешностей измерений частотно-зависимой магнитной восприимчивости при изучении магнитной вязкости геологических сред (на примере моста Bartington MS2) / Н. О. Кожевников, Я. К. Камнев, А. Ю. Казанский // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 4. – С. 650 – 659.

Нагата, Т. Магнетизм горных пород / Т. Нагата – М.:Мир, 1965. – 176с.

Секачов, М. Ю. Аппаратурный электроразведочный комплекс «ЦИКЛ-7» / М. Ю. Секачов, Б. А. Балашов, Г. В. Саченко, О. В. Вечкапов, А. К. Захаркин, Н. Н. Тарло, В. С. Могилатов, А. В. Злобинский // Приборы и системы разведочной геофизики. – №01(15) . – 2006. – С. 44 – 46.

Сквайрс, Дж. Практическая физика / Дж. Сквайрс – М.:Мир, 1971. – 246 с.

Способ геоэлектроразведки: Патент РФ № 2045083 / Захаркин А.К., Бубнов В.М. Опубликовано 27.09.95. Бюл. № 27.

Стогний, В. В. Исследование магнитной вязкости горных пород в условиях их естественного залегания с помощью импульсной индуктивной электроразведки / В. В. Стогний, Н. О. Кожевников, Е. Ю. Антонов // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 11. – С. 1565 – 1575.

Трухин, В. И. Введение в магнетизм горных пород / В. И. Трухин. – М.: МГУ, 1973. – 272 с.

Филатов, В.В. Электродинамика гетерогенных сред в обратных задачах импульсной электроразведки (фрактальный подход и линеаризация) :дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 25.00.20 / В.В. Филатов. – Новосибирск, 2002. – 263 с.

Barsukov, P. O. Superparamagnetism effect over gold and nickel deposits / P. O. Barsukov, B. E. Fainberg // *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2001. – Vol.6. – P. 61 -72.

Banerjee, S. K. Separation of local signals from the regional paleomonsoon record of the Chinese Loess Plateau: A rock-magnetic approach / S. K. Banerjee, C. P. Hunt, X. M. Liu // *Geophys. Res. Lett.* – 1993. – Vol.20. – P. 843–846. doi:10.1029/93GL00908.

Brown Jr., W. F. Thermal fluctuations of a singledomain particle / W. F. Brown Jr. // *J. Appl. Phys.* – 1963. – Vol.34. – P. 1319-1320.

Buselli, G. The effect of near surface superparamagnetic material on electromagnetic transients / G. Buselli // *Geophysics*. – 1982. – Vol. 47. – N 9. – P. 1315-1324.

Chang, S. B. R., J. L. Kirschvink Magnetofossils, the magnetization of sediments, and the evolution of magnetite biomineralization / S. B. R. Chang, J. L. Kirschvink // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* – 1989. – Vol.17. – P. 169–195. doi:10.1146/annurev.ea.17.050189.001125.

Clark, D. A. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys / D. A. Clark // *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*. – 1997. – Vol.17. –N.2. – P. 83 – 103.

Colani, C. Utilization of magnetic viscosity effects in soils for archaeological prospection / C. Colani, M. J. Aitken // *Nature*. – 1966. – Vol. 212. – P. 1446 – 1447.

Dabas, M. Time-domain magnetization of soils (VRM), experimental relationship to quadrature susceptibility / M. Dabas, J.R. Skinner // *Geophysics*. – 1993. – Vol.58. – N3. – P. 326-333.

Das, Y. Effect of soil electromagnetic properties on metal detectors / Y. Das // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2006. – Vol. 44. – N. 6. – P. 1444 – 1453.

Dearing, J. A. Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 system / J.A. Dearing // *Chi Publ., Fairfield, CT*, 1994. – 54p.

Dearing, J. A. Frequency-dependent susceptibility measurement of environmental materials / J. A. Dearing, R. J. L. Dann, K. Hay, J. A. Lees, P. J. Loveland, K. O'Gard / *Geophysics J. Int.* – 1996. – Vol. 124. – P. 228 – 240.

Deng, C. Mineral magnetic variation of the Jiaodao Chinese loess/paleosol sequence and its bearing on long-term climatic variability / C. Deng, N. J. Vidic, K. L. Verosub, M. J. Singer, Q. Liu, J. Shaw, R. Zhu // *J. Geophys. Res.* – 2005. – Vol. 110. – B03103. doi:10.1029/2004JB003451.

Dormann, J. L. Magnetic Relaxation in fine-particle systems / J. L. Dormann, D. Fiorani, E. Tronc // *Advances in Chemical Physics*, vol. XCVIII, edited by I. Prigogine and S. A. Rice, 1997. – P. 283–494. doi:10.1002/9780470141571.ch4

Dunlop, D. J. Theory of the magnetic viscosity of lunar and terrestrial rocks / D. J. Dunlop // *Rev. Geophys.* – 1973. – Vol. 11. – P. 855–901. doi:10.1029/RG011i004p00855.

Dunlop, D. J. Viscous magnetization of 0.04–100 μm magnetites / D. J. Dunlop // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* – 1983. – Vol. 74. – P. 667–687.

Dunlop, D.J. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers* / D.J. Dunlop, Ö.Özdemir. Cambridge University Press, New York, London and Cambridge, 1997. – 573 p.

Eick, P. M. The use of magnetic susceptibility and its frequency dependence for delineation of a magnetic stratigraphy in ash-flow tuffs / P. M. Eick, Ch. M. Schlenger // *Geophysical research letters.* – 1990. – Vol. 17. – N. 6. – P. 783–786. doi:10.1029_gl017i006p00783

Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism, (eds. Gubbins D., and Herrero-Bervera, E.) . – 2007. – Springer. – 1054 p. *Encyclopedia of Earth Science Series*, XXVI.

Enkin, R. J. Magnetic hysteresis parameters and Day plot analysis to characterize diagenetic alteration in gas hydrate-bearing sediments / R. J. Enkin, J. Baker, D. Nourgaliev, P. Iassonov, T. S. Hamilton. // *Journal of geophysical research.* – 2007. – Vol. 112. – 13 P. doi:10.1029/2006JB004638

Eyre, J. K. Frequency dependence of magnetic susceptibility for populations of single-domain grains / J. K. Eyre // *Geophys. J. Int.* – 1997. – №129. – P. 209 – 211.

Fannin, P.C. On the influence of distribution functions on the after-effect function of ferrofluids / P.C. Fannin, S.W. Charles // *J. Phys. D. Appl. Phys.* – 1995. – Vol. 28. – P. 239-242.

Galindo-Gonzalez, C. Magnetic and microscopic characterization of magnetite nanoparticles adhered to clay surfaces / C. Galindo-Gonzalez, J. M. Feinberg, T. Kasama, L. C. Gontard, M. Pósfaí, I. Kósa, J. D.G. Duran, J. E. Gil, R. J. Harrison, R. E. Dunin-Borkowski // *American Mineralogist.* – 2009. Vol. 94. – №9. – P. 1120-1129.

Heller, F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetism / F. Heller, M. E. Evans. – Academic Press, New York. – 2003. – 299 P.

Hrouda, F. Models of frequency-dependent susceptibility of rocks and soils revised and broadened / F. Hrouda // *Geophys. J. Int.* – 2011. – Vol. 187. – P. 1259 – 1269.

Hrouda, F. Extremely high demands for measurement accuracy in precise determination of frequency-dependent magnetic susceptibility of rocks and soils / F. Hrouda, J. Pokorný // *Stud. Geophys. Geod.* – 2011. – Vol. 55. – P. 667 – 681.

Hunt, C. Rock-magnetic proxies of climate change in the loess-paleosol sequence of the western loess plateau of China / C. P. Hunt, S. K. Banerjee, J. Han, P. A. Solheid, E. Oches, W. Sun, T. Liu, // *Geophys. J. Int.* – 1995. – Vol. 123. – P. 232 – 244.

Knobel, M. Superparamagnetism and Other Magnetic Features in Granular Materials: A Review on Ideal and Real Systems / M. Knobel, W. C. Nunes, L. M. Socolovsky, E. De Biasi, J.M.Vargas, J. C. Denardin // *Journal of nanoscience and Nanotechnology.* – 2008. – Vol.8. – P. 2836–2857.

Kodama, K. Application of broadband alternating current magnetic susceptibility to the characterization of magnetic nanoparticles in natural materials /

K. Kodama // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2013. – Vol. 118. – P. 1 – 12, doi:10.1029/2012JB009502

Kozhevnikov, N. O. Magnetic viscosity of fired clays and the possibility of its use for archaeological prospection / N. O. Kozhevnikov, S. P. Nikiforov // *Proc. of the Archaeological Science Conference*. – Bournemouth University. – 1995. – P.163 – 169.

Kozhevnikov, N.O. An accidental geophysical discovery of an Iron Age archaeological site on the western shore of Lake Baikal / N. O. Kozhevnikov, A. V. Kharinsky, O. K. Kozhevnikov // *Journal of Applied Geophysics*. – 2001. – №47(2). – p. 107–122.

Kozhevnikov, N. O. Chemical composition and magnetism of ancient metallurgical slags from the Chernorud site on the western shore of Lake Baikal / N. O. Kozhevnikov, O. K. Kozhevnikov, A. V. Kharinsky, M. Urbat // *Archaeometallurgy in Europe. Proc. Int. Conf. Milan, Italy, 2003*. – Vol.1. – P. 525 – 534.

Kozhevnikov, N.O. The TEM method in studies of near-surface magnetically viscous rocks / N.O. Kozhevnikov, E.Y. Antonov // *Near Surface Geoscience 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Paris, France, 3 – 5 September 2012. – 5 P.

Lee, T. J. The effect of a superparamagnetic layer on the transient electromagnetic response of a ground / T. J. Lee // *Geophysical Prospecting*. – 1984a. – Vol. 32. – P. 480-496.

Lee, T. J. The transient electromagnetic response of a magnetic or superparamagnetic ground / T. J. Lee // *Geophysics*. – 1984b. – Vol. 49. – N 7. – P. 854-860.

Linford, N. Archaeological applications of naturally occurring nanomagnets / N. Linford // *Journal of Physics: Conference Series* 17. – 2005. – P. 127–144. doi:10.1088/1742-6596/17/1/019

Liu, Q. S. Grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess/paleosols / Q. S. Liu, M. J. Jackson, Y. J. Yu, F. H. Chen, C. L. Deng, R. X. Zhu // *Geophys. Res. Lett.* – 2004a. – №31. – P. 1-4. doi:10.1029/2004GL021090.

Liu, Q. S. Grain sizes of susceptibility and anhysteretic remanent magnetization carriers in Chinese loess/paleosol sequences / Q. S. Liu, S. K. Banerjee, M. J. Jackson, B. A. Maher, Y. X. Pan, R. X. Zhu, C. L. Deng, and F. H. Chen // *J. Geophys. Res.* – 2004b. – №109. doi:10.1029/2003JB002747.

Liu, Q. S. Quantifying grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess and its significance for pedogenesis / Q. S. Liu, J. Torrent, B. A. Maher, Y. J. Yu, C. L. Deng, R. X. Zhu, and X. X. Zhao // *J. Geophys. Res.* – 2005. – №110. – 102 P.. doi:10.1029/2005JB003726.

Machac, T.A. Time dependent IRM acquisition as tool to quantify the abundance of ultrafine superparamagnetic magnetite in loessic soils / T.A. Machac, C.W. Zanner, Ch.E. Geissl // *Geophys. J. Int.* – 2007. – Vol. 169, P. 483—489. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03355.x.

Maher, B. A. Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols / B. A. Maher, R. Thompson // *Geology.* – 1991. – №19. – P. 3–6. doi:10.1130/0091-7613(1991)019

Maher, B. A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic palaeosols: Palaeoclimatic implications / B. A. Maher // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* – 1998. – №137. – P. 25–54. doi:10.1016/S0031-0182(97)00103-X.

McNeill, J.D. Applications of transient electromagnetic techniques: Technical Note N7 / J.D. McNeill, // *Geonics Limited.* – 1980. – 17 P.

McCracken, K. G. A comparison of electromagnetic exploration systems / K. G. McCracken, M. L. Oristaglio, G. W. Hohmann // *Geophysics.* – 1986. – Vol. 51. – No. 3. – P. 810-818.

Mørup S. in *Applications of Mössbauer Spectroscopy*, vol. 2 / S. Morup // *Plenum Press*, New York, 1987. – 89 P.

Mullins, C.T. Magnetic viscosity, quadrature susceptibility, and frequency dependence of susceptibility in single-domain assemblies of magnetite and maghemite / C.T. Mullins, M.S. Tite // *Journal of Geophysical Research*. – 1973. – Vol. 78. – N. 5. – P. 804 – 809.

Néel, L. Théorie du trainage magnétique des ferromagnétiques en grains fin avec application aux terres cuites / L.Néel // *Ann. Géophys.* – 1949. – №5. – P. 99 – 136.

Nelder, J.A. A simplex method for function minimization / J.A. Nelder, R. Mead // *Computer Journal*. – 1965. – N. 7. – P. 308–313.

Neumann, J. Messung der TEM-Antwort von Bodenproben / J. Neumann, R. Bergers, S. L. Helwig, T. Hanstein, N. Kozhevnikov, B. Tezkan // 21 Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung Haus Wohldenberg, Holle, 3-7.10.2005, Hrsg.: O. Ritter und H. Brasse. – P. 331 – 338. ISSN 0946-7467

Neumann, J. Untersuchung von EM-Transienten einer Altlast auf superparamagnetischen Einfluss / J. Neumann – Diplomarbeit, Universität zu Köln, 2006. – 137 P.

Oldfield, F., R. Thompson, and D. P. E. Dickson Artificial enhancement of stream bedload: A hydrological application of superparamagnetism / F. Oldfield, R. Thompson, D. P. E. Dickson // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 1981. – №26. – P. 107 – 124. doi:10.1016/0031-9201(81)90103-5.

Pasion, L. R. Evaluating the effects of magnetic soils on TEM measurements for UXO detection / L. R. Pasion, S. D. Billings, D. W. Oldenburg // *Expanded Abstracts. Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, OK. – 2002. – P. 1428-1431.

Pokorný, J. Widening power of low-field magnetic methods in the investigation of rocks and environmental materials using the Multi-Function Kappabridge Set / J. Pokorný, P. Suza, P. Pokorný, M. Chlupáčová, F. Hrouda // *Geophys. Res. Abstr.* – 2006. – №8. – EGU 06-A-04141.

Pokorný, J. A multi-function Kappabridge for high precision measurement of the AMS and the variations of magnetic susceptibility with field, temperature and frequency / J. Pokorný, P. Pokorný, P. Suza, F. Hrouda // *The Earth's Magnetic*

Interior, IAGA Special Sopron Book Series,, Petrovský, E.; Herrero-Bervera, E.; Harinarayana, T. & Ivers, D.(ed.), *Springer*, 2011. – N. 1. – P. 292-301.

Tabbagh, A. Application and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting / A. Tabbagh // *Geophysics*. – 1986. – Vol. 51, N. 3. P. 576 – 584.

Tebble, R. S. Magnetic Domains / R. S. Tebble. – Methuen & Co., London, 1969. – 128 P.

Sagnotti, L. On the magnetic characterization and quantification of the superparamagnetic fraction of traffic-related urban airborne PM in Rome, Italy / L. Sagnotti, A. Winkler // *Atmospheric Environment*. – 2012. – №59. – P. 131 – 140.

Stoner, E. C. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys / E. C. Stoner, E. P. Wohlfarth // *Philos. Trans. R. Soc. London*. – 1948. – Ser. A. – N. 240. – P. 599–642. doi:10.1098/ rsta.1948.0007.

Tarduno, J. A. Temporal trends of magnetic dissolution in the pelagic realm: Gauging paleoproductivity? / J. A. Tarduno // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1994. – Vol.123. – p. 39–48. doi:10.1016/0012-821X(94)90255-0.

The geophysics of the Elura orebody / D.M. Emerson, Ed., Sydney. – Austral. Soc. Expl. Geophys, 1980. – 205 p.

Thiesson, J. TDEM magnetic viscosity prospecting using a Slingram coil configuration / J. Thiesson, A. Tabbagh, S. Flageul // *Near Surface Geophysics*. – 2007. – P. 363 – 374.

Thompson, R. Environmental Magnetism / R. Thompson, F. Oldfield. – Allen and Unwin, London. – 1986. – 227 P.

Topsøe, H. in Applications of Mössbauer Spectroscopy, vol. 2 / H. Topsoe, J. A. Dumesic, and S. Morup // Academic Press, New York, 1980. – P. 55.

Verosub, K. L. Environmental magnetism: Past, present, and future / K. L. Verosub, A. Roberts // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100. – P. 2175– 2192. doi:10.1029/94JB02713.

West, G. F. A time-domain EM system measuring the step response of the ground / G. F. West, J. C. Macnae, Y. Lamontagne // *Geophysics*. – 1984. – Vol. 49. – No. 7. – P. 1010-1026.

Worm, H.-U. Magnetic susceptibility of pyrrhotite: grain size, field and frequency dependence / H.-U. Worm, D. Clark, M.J. Dekkers // *Geophys. J. Int.* – 1993. – Vol. 114. – P. 127 – 137.

Worm, H.-U. On the superparamagnetic-stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility / H.-U. Worm // *Geophys. J. Int.* – 1998. – Vol. 133. – P. 201– 206.

Worm, H.-U. Time-dependent IRM: A new technique for magnetic granulometry / H.-U. Worm // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – Vol. 26, N. 16. – P. 2557–2560. doi:10.1029/1999GL008360.

Worm, H.-U. The superparamagnetism of Yucca Mountain Tuff / H.-U. Worm, M. Jackson // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104. – N. B11. – P. 25,415 – 25,425.

Xie, Q. Quantification of the contribution of pedogenic magnetic minerals to magnetic susceptibility of loess and paleosols on Chinese Loess Plateau: Paleoclimatic implications / Q. Xie, T. Chen, H. Xu, J. Chen, J. Ji, H. Lu, X. Wang //, *J. Geophys. Res.* – 2009. – №114. – B09101. doi:10.1029/2008JB005968.

Wang, X. Quantifying ultrafine pedogenic magnetic particles in Chinese loess by monitoring viscous decay of superparamagnetism / X. Wang, R. Løvlie, X. Zhao, Z. Yang, F. Jiang, S. Wang // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G3)*, - 2010. – Vol. 11. – N. 10. – Q10008. doi:10.1029/2010GC003194

Yu, Y. Acquisition of viscous remanent magnetization / Y. Yu, L. Tauxe // *Physics of the Earth and Planetary interiors*. – 2006. – №159. – P. 32 – 42.

Zadorozhnaya, V. Yu. Superparamagnetic effect, effect provided by “red soil” in Southern Africa / V. Yu. Zadorozhnaya, N. O. Kozhevnikov, P. Nyabeze // *Extended Abstract, 21st EM Induction Workshop Darwin, Australia, July 25-31, 2012*. – 4 p.

Zhou, L. P. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess /
L. P. Zhou, F. Oldfield, A. G. Wintle, S. G. Robinson, J. T. Wang // Nature. – 1990.
– Vol. 346. – P. 737–739. doi:10.1038/ 346737a0.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

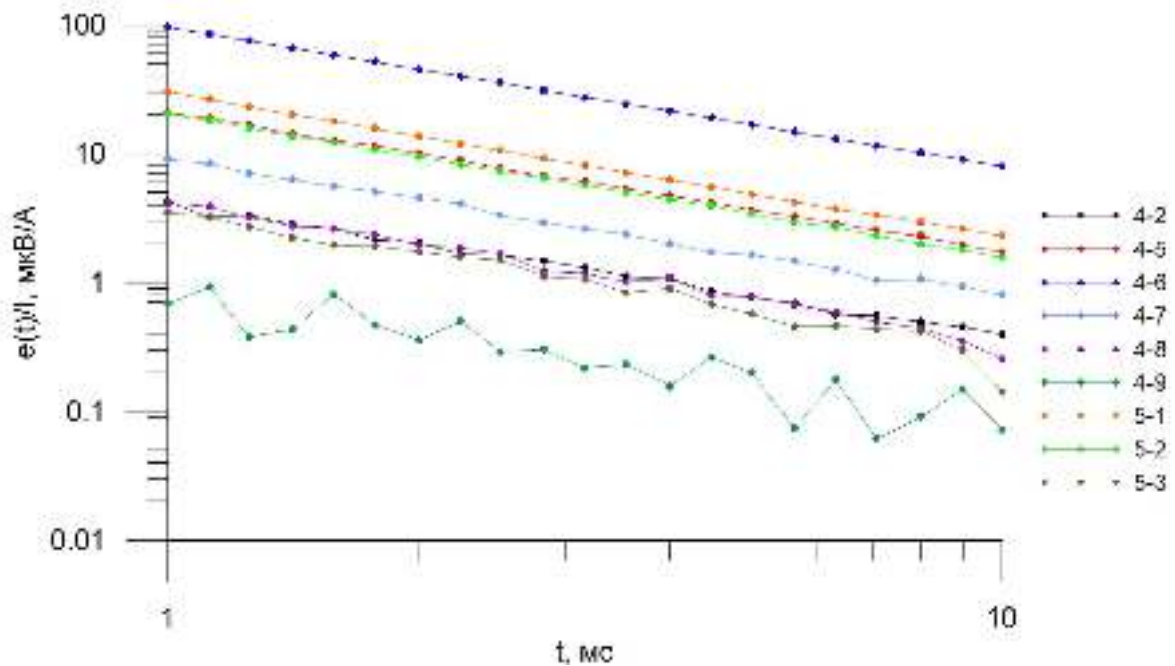
Витимские базальты (1)

Приложение А.1 – Результаты измерения магнитной вязкости Витимских базальтов (1) во временной и частотной областях. Во временной области представлены импульсные характеристики намагниченности $U(t)/I$ полученные во временном интервале от 1 мс до 10 мс, а также параметры амплитуды a и показателя степени b аппроксимирующей их степенной функции. В частотной области представлена разность магнитных восприимчивостей $\kappa_1 - \kappa_3$, измеренных на частотах $f_1 = 976$ Гц, $f_3 = 15616$ Гц с помощью прибора AGICO Kappabridge MFK1.

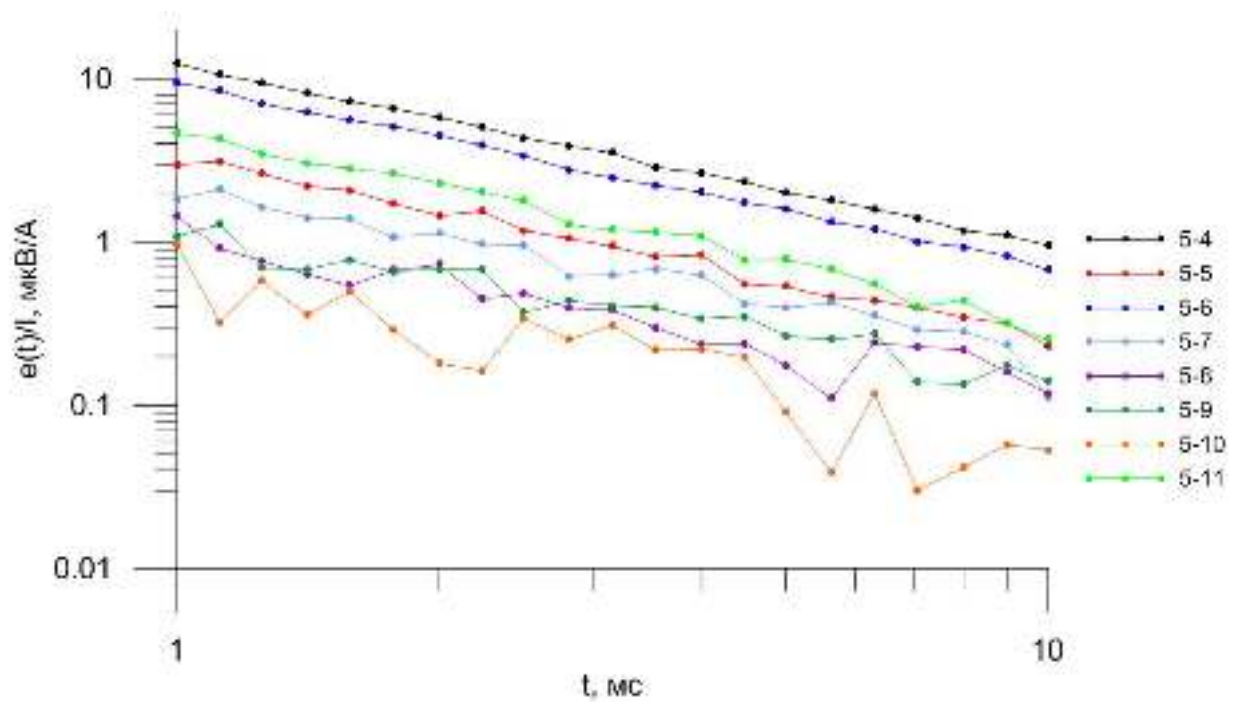
		№ образца								
t, мс		4-2	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	5-1	5-2	5-3
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	4.28	20.76	94.80	8.96	4.16	0.68	30.28	20.28	3.46
	1.1	3.22	18.95	83.79	8.36	3.91	0.91	26.43	17.90	3.22
	1.25	3.37	16.68	74.21	7.06	3.21	0.38	23.01	15.77	2.67
	1.41	2.82	14.39	65.07	6.28	2.75	0.43	19.99	13.68	2.21
	1.58	2.62	12.74	57.74	5.55	2.61	0.80	17.80	12.30	1.95
	1.77	2.17	11.62	51.06	5.08	2.36	0.47	15.57	10.60	1.91
	2	2.04	10.06	44.69	4.57	2.00	0.35	13.74	9.41	1.72
	2.24	1.67	8.87	39.64	4.09	1.86	0.50	11.92	8.25	1.57
	2.5	1.64	7.71	35.21	3.32	1.69	0.29	10.59	7.31	1.48
	2.82	1.47	6.76	30.75	2.93	1.23	0.30	9.09	6.49	1.11
	3.16	1.31	6.15	27.35	2.60	1.17	0.22	8.12	5.66	1.06
	3.54	1.12	5.36	24.19	2.36	1.02	0.23	7.12	5.01	0.83
	4	1.08	4.74	21.33	2.02	1.08	0.16	6.26	4.40	0.90
	4.48	0.86	4.21	18.75	1.72	0.80	0.26	5.51	3.94	0.67
	5	0.77	3.71	16.58	1.64	0.79	0.20	4.82	3.42	0.57
	5.64	0.69	3.28	14.62	1.47	0.67	0.07	4.23	2.92	0.45
	6.32	0.57	2.90	12.98	1.26	0.59	0.17	3.70	2.67	0.46
	7.1	0.55	2.54	11.44	1.04	0.50	0.06	3.35	2.30	0.43
	8	0.50	2.30	10.09	1.07	0.44	0.09	2.94	2.01	0.42
	8.96	0.45	1.98	8.91	0.94	0.35	0.15	2.60	1.79	0.30
10	0.40	1.73	7.87	0.80	0.26	0.07	2.30	1.55	0.14	
a		4	21.1	94.5	9.1	4.4	0.8	29.6	20.3	3.7
b		1.011	1.078	1.078	1.063	1.121	0.992	1.118	1.108	1.168
k ₁ -k ₃		0	85.5	137.8	69.1	29.7	4	200	66	20

Приложение А.1 – Продолжение.

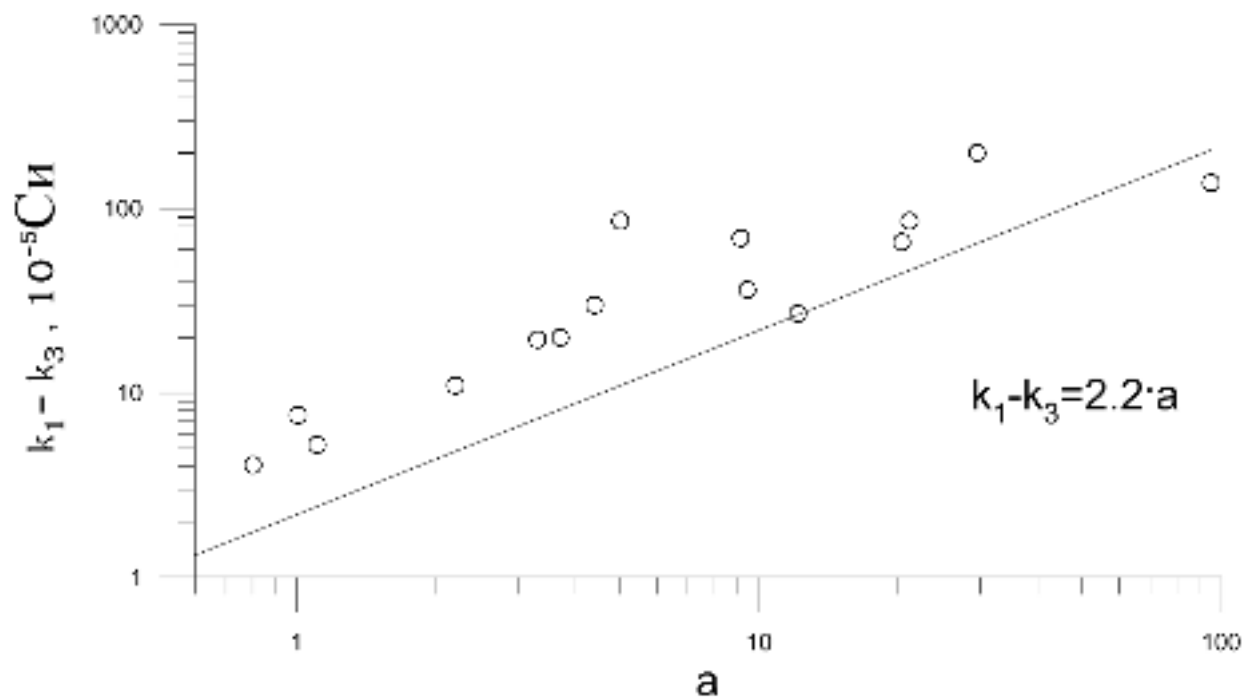
	t, мс	№ образца							
		5-4	5-5	5-6	5-7	5-8	5-9	5-10	5-11
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	12.35	2.97	9.39	1.85	1.42	1.09	0.96	4.65
	1.1	10.50	3.12	8.44	2.11	0.91	1.29	0.32	4.29
	1.25	9.42	2.62	7.03	1.65	0.76	0.70	0.57	3.46
	1.41	8.11	2.20	6.20	1.42	0.63	0.68	0.36	3.05
	1.58	7.20	2.07	5.54	1.39	0.54	0.78	0.49	2.82
	1.77	6.53	1.72	5.10	1.07	0.67	0.66	0.29	2.63
	2	5.76	1.45	4.47	1.14	0.72	0.69	0.18	2.30
	2.24	5.04	1.54	3.89	0.98	0.45	0.68	0.16	2.03
	2.5	4.31	1.18	3.37	0.97	0.48	0.37	0.34	1.79
	2.82	3.85	1.05	2.76	0.62	0.39	0.44	0.25	1.28
	3.16	3.49	0.94	2.46	0.63	0.38	0.41	0.31	1.18
	3.54	2.85	0.81	2.21	0.69	0.30	0.40	0.22	1.15
	4	2.64	0.83	2.01	0.63	0.23	0.34	0.22	1.09
	4.48	2.32	0.55	1.73	0.42	0.24	0.35	0.20	0.78
	5	1.99	0.53	1.59	0.40	0.17	0.27	0.09	0.78
	5.64	1.80	0.46	1.32	0.43	0.11	0.25	0.04	0.68
	6.32	1.58	0.44	1.20	0.36	0.24	0.28	0.12	0.55
	7.1	1.40	0.40	1.01	0.29	0.23	0.14	0.03	0.40
	8	1.17	0.35	0.93	0.28	0.22	0.14	0.04	0.44
	8.96	1.09	0.32	0.82	0.24	0.16	0.18	0.06	0.32
	10	0.95	0.23	0.67	0.11	0.12	0.14	0.05	0.25
a		12.1	3.3	9.4	2.2	1	1.1	0.6	5
b		1.107	1.105	1.126	1.046	0.91	0.896	1.177	1.216
k ₁ -k ₃		26.9	19.5	36.2	10.9	7.5	5.2	0	85.3



Приложение А.2 – Импульсные характеристики намагниченности образцов Витимских базальтов (1).



Приложение А.3 – Импульсные характеристики намагниченности образцов Витимских базальтов (1).



Приложение А.4 – Корреляция между результатами измерений образцов Витимских базальтов (1) во временной и частотной областях.

Приложение Б

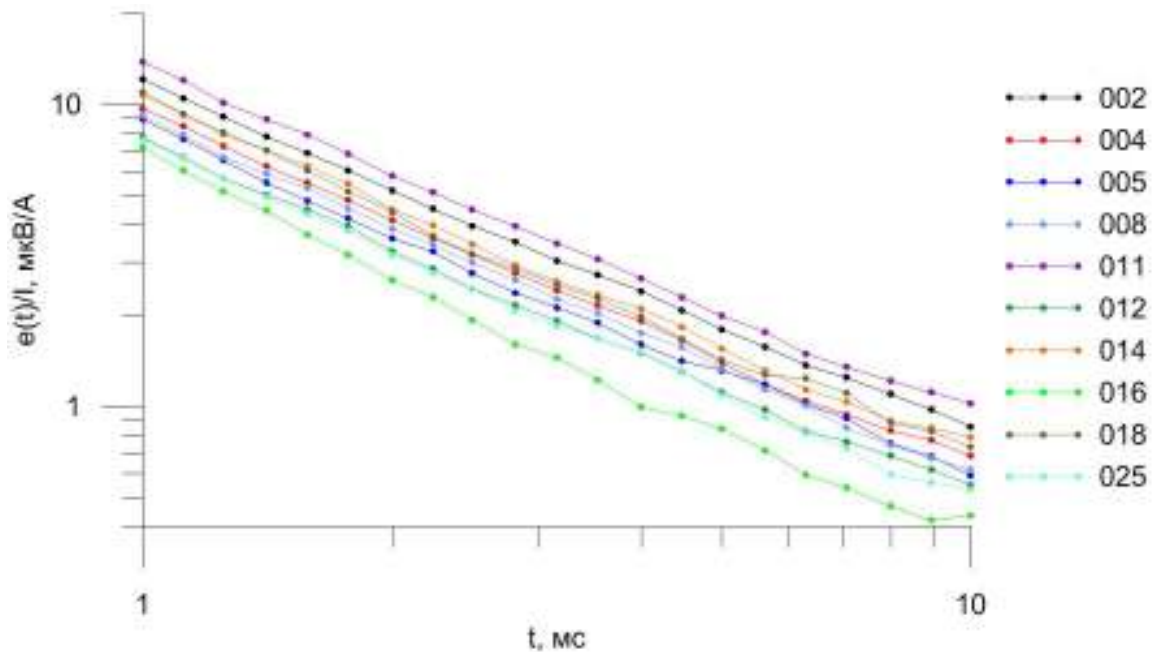
Витимские базальты (2)

Приложение Б.1 – Результаты измерения магнитной вязкости кубических образцов Витимских базальтов (2) во временной и частотной областях. Во временной области представлены импульсные характеристики намагниченности $U(t)/I$ полученные во временном интервале от 1 мс до 10 мс, а также параметры амплитуды a и показателя степени b аппроксимирующей их степенной функции. В частотной области представлена разность магнитных восприимчивостей $\kappa_1 - \kappa_2$, измеренных на частотах $f_1 = 465$ Гц, $f_2 = 4650$ Гц с помощью прибора Bartington MS2.

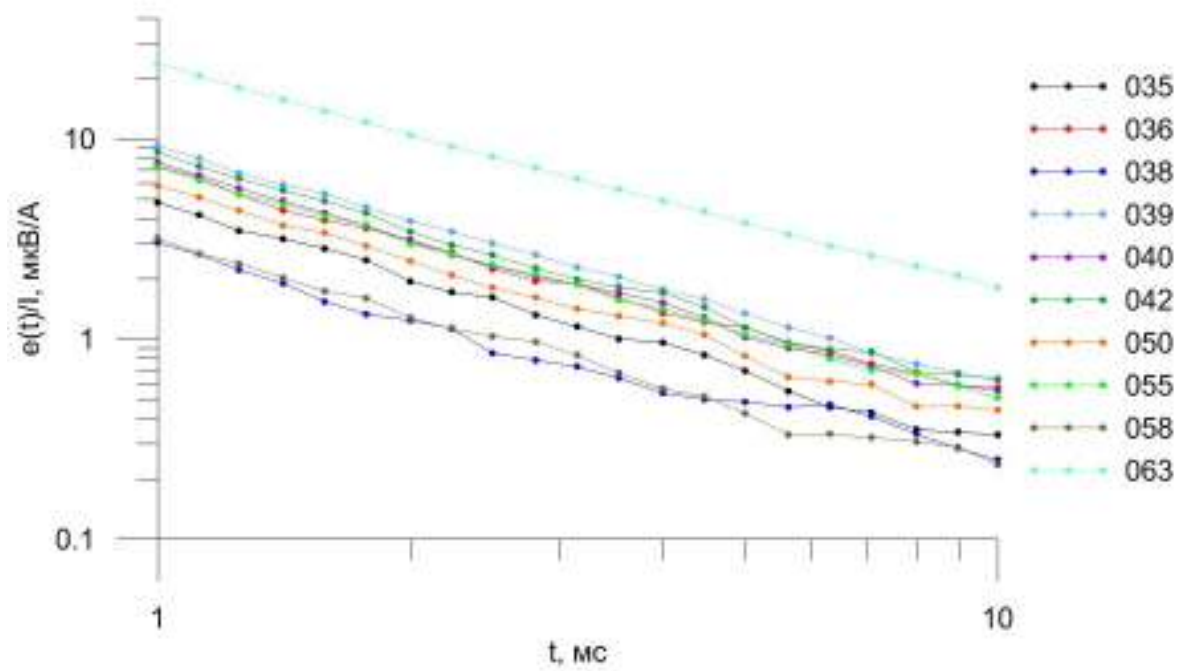
		№ образца									
t, мс		002	004	005	008	011	012	014	016	018	025
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	12.10	9.65	8.93	9.18	13.82	7.77	10.74	7.16	10.92	7.58
	1.1	10.50	8.45	7.70	7.96	12.05	6.67	9.24	6.03	9.26	6.59
	1.25	9.13	7.29	6.55	6.71	10.15	5.70	7.97	5.15	8.06	5.66
	1.41	7.83	6.23	5.52	5.90	8.93	5.03	7.03	4.44	7.01	4.95
	1.58	6.90	5.49	4.82	5.30	7.96	4.50	6.26	3.70	6.01	4.32
	1.77	6.06	4.82	4.19	4.54	6.86	3.95	5.45	3.17	5.14	3.82
	2	5.20	4.13	3.60	3.88	5.80	3.26	4.49	2.61	4.40	3.17
	2.24	4.51	3.61	3.26	3.44	5.12	2.85	3.99	2.30	3.66	2.76
	2.5	3.96	3.18	2.76	2.99	4.49	2.45	3.44	1.94	3.20	2.44
	2.82	3.50	2.76	2.38	2.63	3.96	2.17	2.93	1.60	2.85	2.07
	3.16	3.04	2.42	2.13	2.27	3.47	1.92	2.59	1.45	2.52	1.84
	3.54	2.73	2.16	1.90	2.04	3.09	1.68	2.33	1.22	2.27	1.67
	4	2.41	1.91	1.60	1.76	2.66	1.51	2.10	0.99	1.98	1.51
	4.48	2.08	1.65	1.42	1.57	2.30	1.31	1.83	0.93	1.67	1.31
	5	1.80	1.39	1.32	1.34	2.00	1.11	1.56	0.84	1.42	1.09
	5.64	1.58	1.18	1.18	1.14	1.77	0.97	1.32	0.72	1.27	0.92
	6.32	1.37	1.04	1.02	1.01	1.50	0.83	1.14	0.59	1.24	0.81
	7.1	1.24	0.94	0.91	0.85	1.35	0.77	1.03	0.54	1.10	0.72
	8	1.10	0.83	0.75	0.75	1.22	0.69	0.89	0.47	0.88	0.59
	8.96	0.98	0.77	0.68	0.68	1.11	0.62	0.85	0.42	0.83	0.56
10	0.86	0.69	0.59	0.62	1.03	0.55	0.79	0.44	0.73	0.53	
a		11.7	9.4	8.3	9	13.2	7.4	10.3	6.5	10.1	7.4
b		1.146	1.165	1.15	1.182	1.152	1.159	1.165	1.274	1.17	1.183
k ₁ -k ₂		47.5	66.2	73.9	83.4	118	66.2	72.1	45.5	77.5	65.1

Приложение Б.1 – Продолжение.

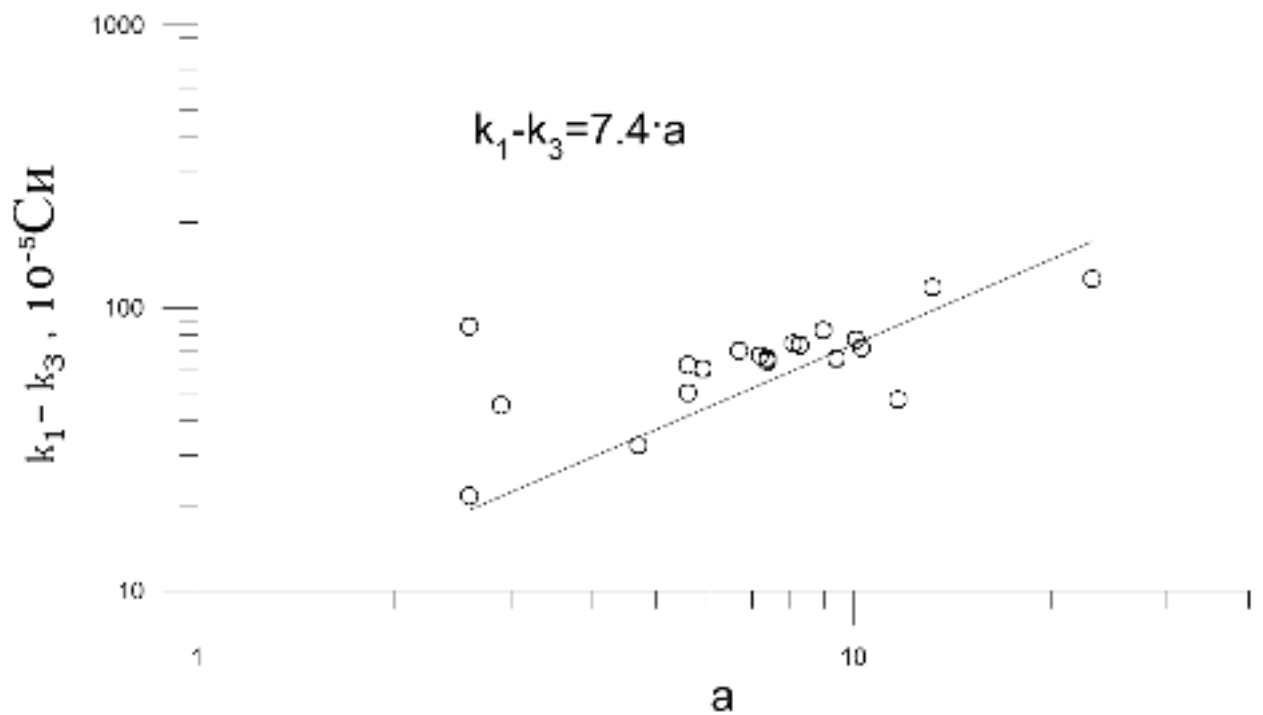
		№ образца									
t,мс		035	036	038	039	040	042	050	055	058	063
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	4.80	7.31	6.27	3.04	7.58	8.62	5.81	7.22	3.20	23.90
	1.1	4.15	6.45	5.35	2.66	6.60	7.32	5.11	6.22	2.67	20.76
	1.25	3.48	5.30	4.57	2.23	5.66	6.35	4.36	5.29	2.39	18.16
	1.41	3.18	4.42	3.89	1.90	4.88	5.55	3.69	4.74	2.02	15.80
	1.58	2.83	3.94	3.42	1.55	4.27	4.91	3.38	4.12	1.74	13.88
	1.77	2.49	3.59	2.93	1.34	3.70	4.28	2.91	3.71	1.60	12.19
	2	1.94	3.13	2.59	1.25	3.08	3.44	2.44	2.98	1.28	10.49
	2.24	1.72	2.72	2.29	1.14	2.64	2.97	2.08	2.65	1.12	9.22
	2.5	1.62	2.25	1.95	0.86	2.32	2.64	1.80	2.35	1.03	8.19
	2.82	1.32	1.96	1.69	0.79	2.05	2.26	1.60	2.10	0.97	7.16
	3.16	1.15	1.91	1.54	0.73	1.87	1.99	1.40	1.87	0.83	6.33
	3.54	1.00	1.61	1.30	0.64	1.70	1.83	1.30	1.57	0.68	5.60
	4	0.96	1.35	1.16	0.54	1.52	1.70	1.19	1.41	0.56	4.92
	4.48	0.83	1.22	1.02	0.50	1.27	1.45	1.05	1.23	0.52	4.35
	5	0.70	1.15	0.91	0.49	1.02	1.15	0.82	1.05	0.43	3.83
	5.64	0.55	0.95	0.82	0.46	0.90	0.96	0.64	0.94	0.33	3.35
	6.32	0.46	0.87	0.74	0.47	0.83	0.89	0.61	0.80	0.33	2.94
	7.1	0.43	0.75	0.62	0.41	0.74	0.87	0.59	0.70	0.32	2.63
	8	0.35	0.68	0.51	0.34	0.60	0.69	0.46	0.67	0.31	2.32
	8.96	0.34	0.59	0.42	0.29	0.59	0.67	0.46	0.58	0.29	2.09
10	0.33	0.57	0.39	0.25	0.55	0.63	0.44	0.51	0.24	1.82	
a		4.7	6.7	5.9	2.6	7.2	8.1	5.6	6.9	3	23.1
b		1.21	1.115	1.173	1.02	1.166	1.167	1.165	1.15	1.141	1.111
k1-k2		32.7	70.3	60.9	85.8	67.8	75.2	50.1	62.7	21.6	126.7



Приложение Б.2 – Импульсные характеристики намагниченности образцов Витимских базальтов (2).



Приложение Б.3 – Импульсные характеристики намагниченности образцов Витимских базальтов (2).

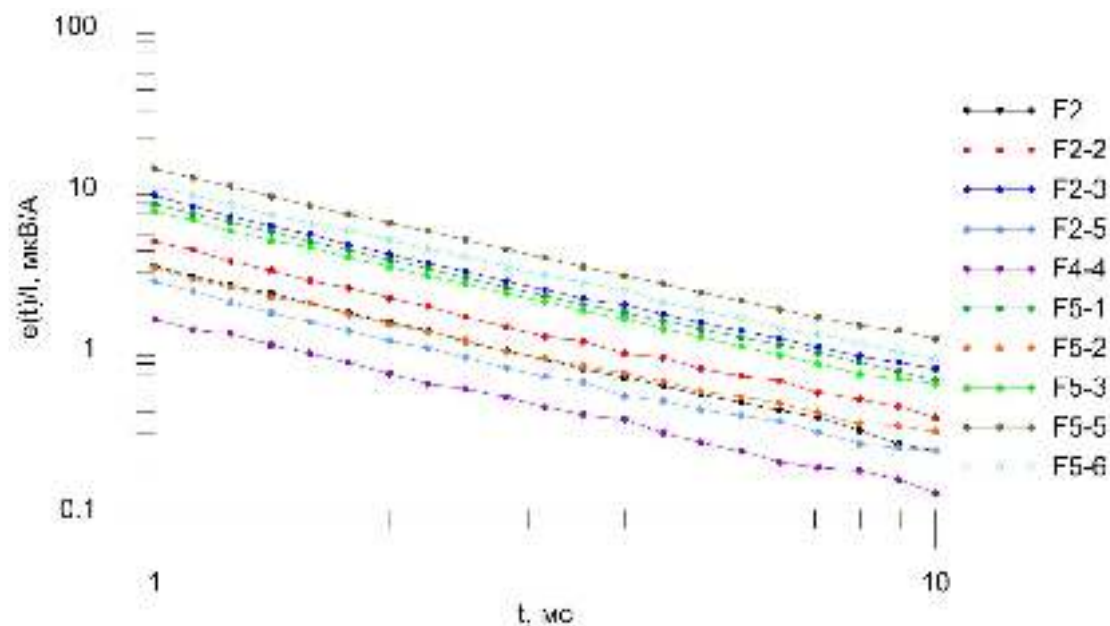


Приложение Б.4 – Корреляция между результатами измерений образцов Витимских базальтов (2) во временной и частотной областях.

Приложение В Образцы горна

Приложение В.1 – Результаты измерения магнитной вязкости кубических образцов горна во временной и частотной областях. Во временной области представлены импульсные характеристики намагниченности $U(t)/I$ полученные во временном интервале от 1 мс до 10 мс, а также параметры амплитуды a и показателя степени b аппроксимирующей их степенной функции. В частотной области представлена разность магнитных восприимчивостей $\kappa_1 - \kappa_3$, измеренных на частотах $f_1 = 976$ Гц, $f_3 = 15616$ Гц с помощью прибора AGICO Kappabridge MFK1.

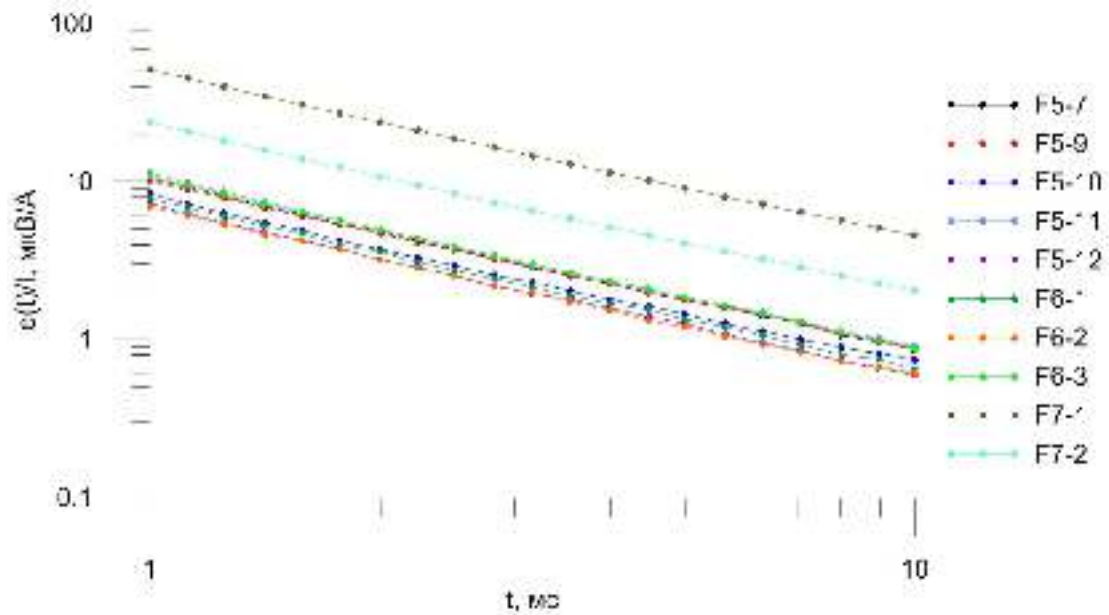
	t, мс	№ образца									
		F2	F2-2	F2-3	F2-5	F4-4	F5-1	F5-2	F5-3	F5-5	F5-6
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	3.26	4.57	8.94	2.58	1.52	7.87	3.16	7.10	13.01	10.01
	1.1	2.80	4.08	7.65	2.27	1.32	6.89	2.67	6.26	11.42	8.99
	1.25	2.47	3.46	6.60	1.93	1.23	6.09	2.38	5.35	10.11	7.81
	1.41	2.19	3.03	5.75	1.66	1.06	5.29	2.06	4.69	8.77	6.72
	1.58	1.91	2.61	5.13	1.46	0.93	4.64	1.90	4.26	7.74	6.04
	1.77	1.66	2.38	4.41	1.28	0.82	4.10	1.62	3.67	6.77	5.42
	2	1.45	2.04	3.85	1.11	0.70	3.56	1.40	3.22	6.02	4.72
	2.24	1.30	1.81	3.37	1.00	0.60	3.13	1.26	2.81	5.31	4.15
	2.5	1.10	1.56	3.01	0.87	0.56	2.75	1.12	2.53	4.71	3.71
	2.82	0.97	1.35	2.61	0.75	0.50	2.40	0.95	2.19	4.12	3.23
	3.16	0.86	1.18	2.32	0.67	0.43	2.13	0.86	1.95	3.64	2.85
	3.54	0.74	1.10	2.04	0.61	0.39	1.88	0.77	1.71	3.21	2.58
	4	0.66	0.92	1.86	0.50	0.36	1.66	0.70	1.53	2.82	2.30
	4.48	0.59	0.87	1.63	0.47	0.30	1.50	0.62	1.33	2.51	1.93
	5	0.52	0.74	1.45	0.42	0.26	1.33	0.54	1.18	2.22	1.73
	5.64	0.46	0.67	1.29	0.38	0.23	1.17	0.50	1.03	1.97	1.54
	6.32	0.41	0.63	1.15	0.35	0.20	1.06	0.45	0.91	1.74	1.34
	7.1	0.38	0.53	1.02	0.30	0.18	0.94	0.40	0.80	1.55	1.22
	8	0.31	0.48	0.89	0.25	0.17	0.82	0.34	0.69	1.38	1.08
	8.96	0.26	0.44	0.82	0.24	0.15	0.72	0.33	0.65	1.29	0.96
	10	0.23	0.37	0.74	0.23	0.13	0.64	0.30	0.60	1.14	0.86
	a	3.2	4.3	8.2	2.4	1.5	7.6	2.9	6.9	12.6	9.9
	b	1.127	1.075	1.059	1.048	1.066	1.08	1.015	1.089	1.064	1.071
	$\kappa_1 - \kappa_3$	24.6	38.2	78.5	15.2	12.3	26.9	14.6	23.6	54.3	35.8



Приложение В.2 – Импульсные характеристики намагниченности образцов горна.

Приложение В.1 – Продолжение.

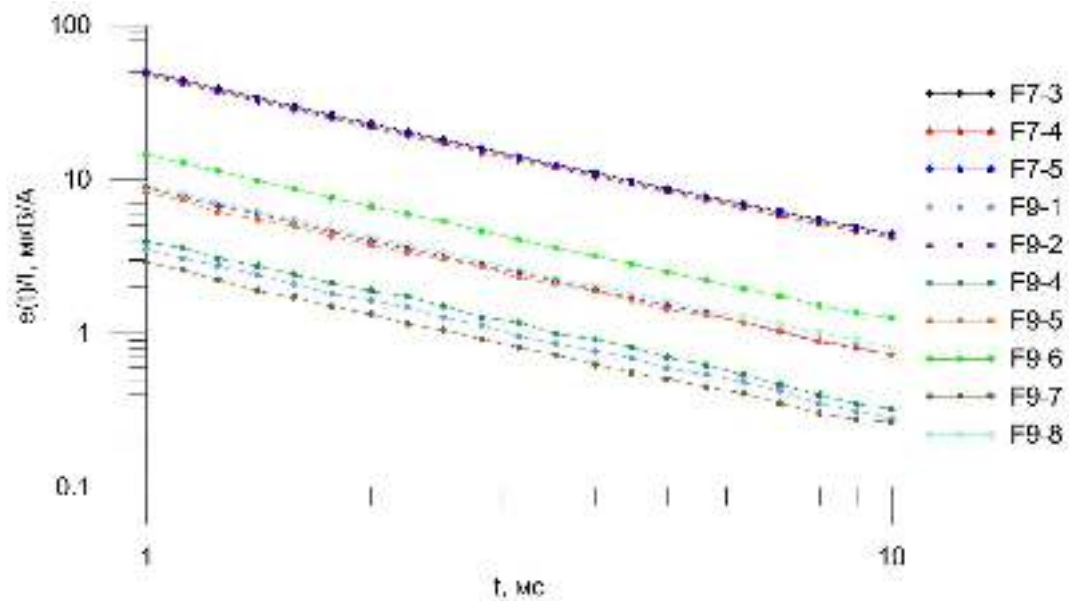
		№ образца									
t, мс		F5-7	F5-9	F5-10	F5-11	F5-12	F6-1	F6-2	F6-3	F7-1	F7-2
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	10.44	10.15	8.44	11.32	7.23	7.87	6.92	10.88	51.25	23.63
	1.1	9.21	8.90	7.24	9.74	6.27	6.86	6.10	9.54	45.12	20.80
	1.25	8.10	7.98	6.37	8.63	5.45	6.06	5.39	8.41	39.81	18.15
	1.41	6.99	6.85	5.56	7.41	4.81	5.27	4.67	7.26	34.71	15.81
	1.58	6.16	6.06	4.93	6.45	4.27	4.73	4.21	6.44	30.63	13.88
	1.77	5.39	5.38	4.27	5.69	3.76	3.99	3.72	5.63	27.00	12.30
	2	4.83	4.71	3.72	4.95	3.20	3.61	3.21	4.99	23.72	10.77
	2.24	4.19	4.16	3.31	4.35	2.85	3.11	2.84	4.42	21.09	9.50
	2.5	3.72	3.70	2.94	3.82	2.54	2.74	2.53	3.90	18.72	8.38
	2.82	3.27	3.25	2.55	3.37	2.18	2.44	2.16	3.42	16.49	7.37
	3.16	2.87	2.85	2.31	2.92	1.96	2.15	1.98	3.02	14.55	6.52
	3.54	2.53	2.54	2.04	2.62	1.80	1.90	1.74	2.65	12.91	5.82
	4	2.25	2.27	1.79	2.32	1.57	1.69	1.53	2.36	11.39	5.13
	4.48	1.98	1.98	1.63	2.05	1.40	1.55	1.32	2.10	10.20	4.55
	5	1.78	1.79	1.45	1.84	1.26	1.34	1.20	1.86	9.06	4.08
	5.64	1.59	1.59	1.26	1.65	1.08	1.21	1.05	1.65	8.00	3.61
	6.32	1.41	1.45	1.13	1.47	0.95	1.06	0.94	1.45	7.15	3.23
	7.1	1.27	1.29	1.01	1.30	0.86	0.93	0.84	1.30	6.38	2.86
	8	1.06	1.10	0.90	1.12	0.73	0.80	0.73	1.12	5.68	2.52
	8.96	0.97	1.00	0.82	1.02	0.66	0.75	0.67	0.99	5.07	2.26
10	0.86	0.88	0.74	0.90	0.60	0.65	0.61	0.87	4.58	2.05	
a		10.2	9.8	7.9	10.7	6.9	7.6	6.8	10.6	49.6	22.6
b		1.079	1.053	1.049	1.087	1.076	1.071	1.068	1.084	1.05	1.058
k ₁ -k ₃		36.5	42.5	52.6	68.3	35.8	27.4	23.2	34.2	216.5	131.5



Приложение В.3 – Импульсные характеристики намагниченности образцов горна.

Приложение В.1 – Продолжение.

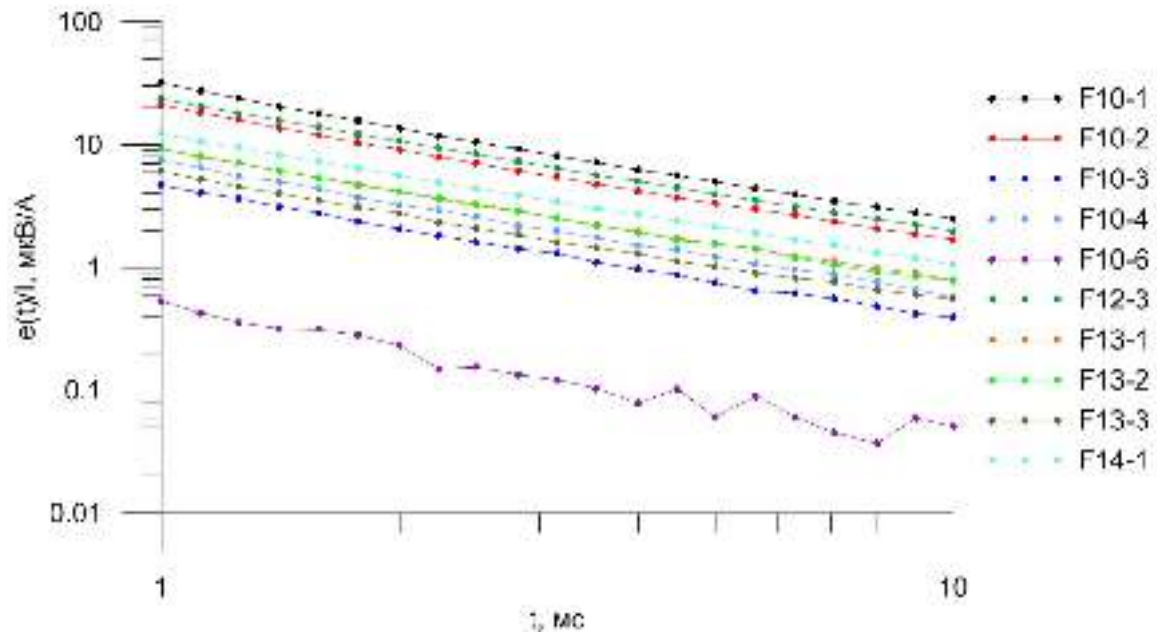
		№ образца									
t, мс		F7-3	F7-4	F7-5	F9-1	F9-2	F9-4	F9-5	F9-6	F9-7	F9-8
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	50.25	47.35	49.08	3.49	8.83	3.93	8.15	14.54	2.89	9.08
	1.1	44.17	41.50	43.21	3.06	7.72	3.62	7.37	12.69	2.59	8.05
	1.25	38.92	36.60	37.84	2.74	6.79	3.07	6.11	11.37	2.23	7.04
	1.41	33.98	31.87	33.12	2.39	5.99	2.74	5.52	9.84	1.90	6.16
	1.58	29.86	28.09	29.15	2.08	5.25	2.42	4.95	8.63	1.71	5.45
	1.77	26.27	24.79	25.67	1.80	4.59	2.12	4.32	7.62	1.50	4.75
	2	23.11	21.64	22.50	1.63	4.01	1.89	3.77	6.69	1.34	4.22
	2.24	20.42	19.11	19.92	1.47	3.58	1.74	3.36	5.92	1.15	3.74
	2.5	18.09	16.96	17.69	1.26	3.16	1.51	3.03	5.34	1.06	3.33
	2.82	15.97	14.89	15.62	1.13	2.77	1.28	2.71	4.62	0.92	2.92
	3.16	14.08	13.25	13.76	0.96	2.47	1.18	2.31	4.07	0.82	2.56
	3.54	12.48	11.79	12.23	0.86	2.19	1.00	2.10	3.60	0.73	2.27
	4	11.06	10.38	10.81	0.76	1.93	0.92	1.89	3.19	0.63	2.03
	4.48	9.82	9.19	9.59	0.69	1.70	0.82	1.63	2.83	0.56	1.84
	5	8.75	8.23	8.55	0.59	1.52	0.70	1.43	2.51	0.51	1.62
	5.64	7.80	7.29	7.61	0.54	1.36	0.63	1.32	2.22	0.45	1.43
	6.32	6.96	6.46	6.78	0.48	1.18	0.54	1.18	1.95	0.41	1.28
	7.1	6.22	5.77	6.08	0.42	1.03	0.47	1.05	1.76	0.35	1.15
	8	5.49	5.10	5.34	0.35	0.88	0.40	0.89	1.52	0.30	1.01
	8.96	4.93	4.61	4.84	0.31	0.81	0.35	0.83	1.36	0.28	0.91
10	4.44	4.15	4.33	0.28	0.73	0.32	0.72	1.26	0.26	0.80	
a		48.4	45.6	47	3.5	8.6	4	7.8	14.2	2.8	8.8
b		1.054	1.058	1.046	1.089	1.083	1.095	1.022	1.071	1.053	1.043
k ₁ -k ₃		228.9	214.3	231.5	11.8	29	16.2	28.9	49.4	12	34.1



Приложение В.4 – Импульсные характеристики намагниченности образцов горна.

Приложение В.1 – Продолжение.

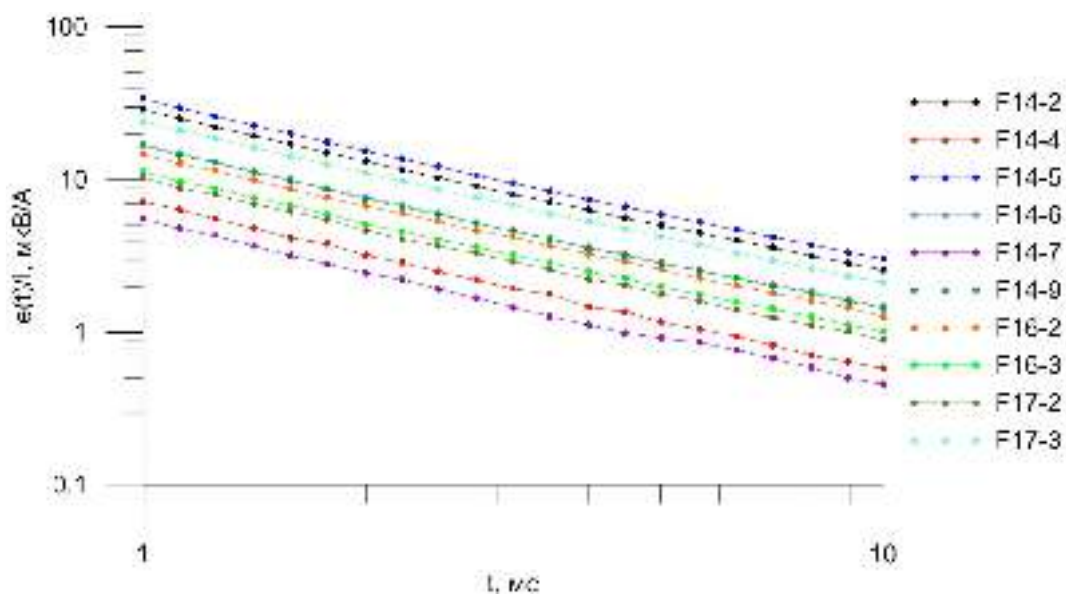
		№ образца									
t, мс		F10-1	F10-2	F10-3	F10-4	F10-6	F12-3	F13-1	F13-2	F13-3	F14-1
U(t)/I измеренное на временных задержках, мВ/А	1	31.68	21.28	4.62	7.38	0.53	23.57	9.15	9.24	6.04	12.39
	1.1	27.33	18.27	4.06	6.56	0.42	20.60	8.03	7.93	5.24	10.72
	1.25	23.89	15.96	3.65	5.46	0.35	18.09	7.08	7.08	4.52	9.51
	1.41	20.49	13.72	3.12	4.99	0.32	15.72	6.14	6.13	4.00	8.32
	1.58	17.85	12.08	2.75	4.38	0.31	13.90	5.37	5.42	3.51	7.30
	1.77	15.66	10.47	2.35	3.72	0.28	12.18	4.76	4.69	3.11	6.48
	2	13.56	9.14	2.04	3.22	0.23	10.75	4.13	4.14	2.75	5.66
	2.24	11.86	8.01	1.81	2.92	0.15	9.37	3.70	3.60	2.34	4.91
	2.5	10.53	7.09	1.60	2.57	0.15	8.34	3.28	3.22	2.07	4.40
	2.82	9.20	6.13	1.40	2.19	0.13	7.30	2.89	2.87	1.86	3.89
	3.16	8.08	5.46	1.29	1.98	0.12	6.47	2.50	2.52	1.60	3.45
	3.54	7.16	4.80	1.10	1.74	0.10	5.66	2.22	2.19	1.44	3.04
	4	6.28	4.24	0.97	1.50	0.08	5.03	1.92	1.98	1.29	2.72
	4.48	5.61	3.74	0.86	1.38	0.10	4.45	1.73	1.68	1.12	2.40
	5	4.97	3.33	0.74	1.21	0.06	3.96	1.54	1.57	1.03	2.15
	5.64	4.40	2.98	0.64	1.07	0.09	3.52	1.41	1.43	0.89	1.91
	6.32	3.92	2.67	0.62	0.95	0.06	3.13	1.24	1.19	0.81	1.69
	7.1	3.48	2.37	0.56	0.88	0.04	2.81	1.11	1.06	0.76	1.54
	8	3.10	2.08	0.48	0.76	0.04	2.47	0.98	0.92	0.66	1.32
	8.96	2.78	1.89	0.42	0.65	0.06	2.23	0.89	0.85	0.60	1.20
	10	2.49	1.69	0.39	0.58	0.05	1.97	0.78	0.78	0.56	1.05
a		29.7	19.7	4.5	7.1	0.5	22.7	8.8	8.8	5.6	11.9
b		1.099	1.085	1.086	1.091	1.087	1.074	1.064	1.078	1.042	1.058
k ₁ -k ₃		238.6	169.4	31.2	61.5	2.1	74.2	37.8	71.8	24	50.8



Приложение В.5 – Импульсные характеристики намагниченности образцов горна.

Приложение В.1 – Продолжение.

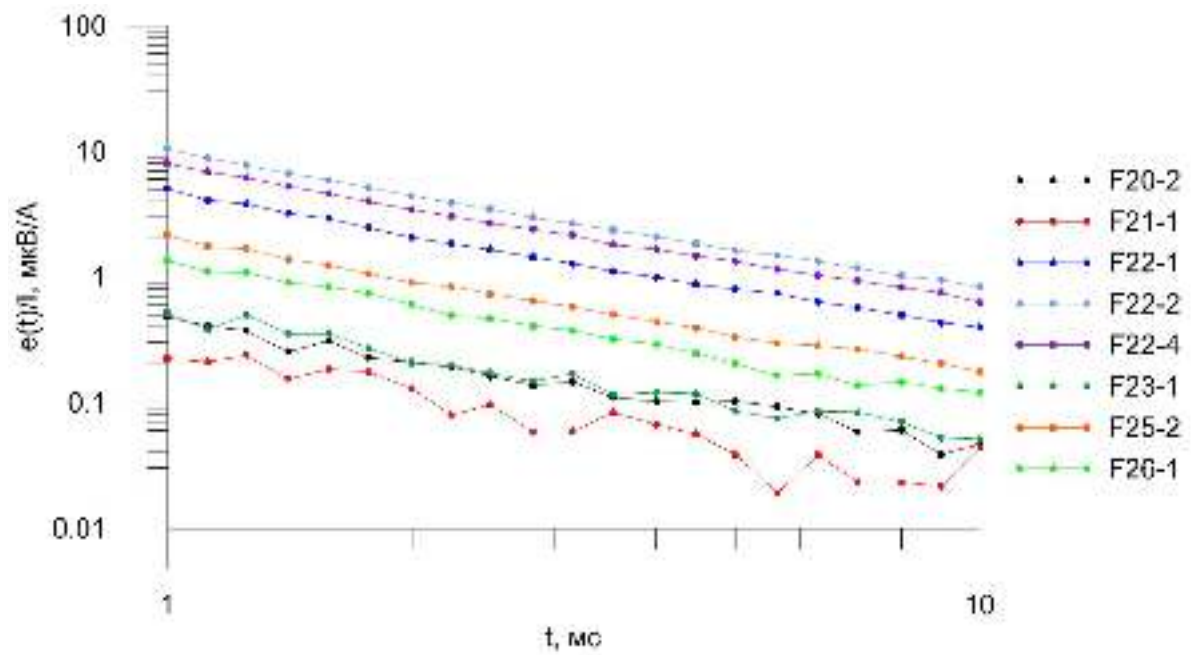
		№ образца									
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	t, мс	F14-2	F14-4	F14-5	F14-6	F14-7	F14-9	F16-2	F16-3	F17-2	F17-3
	1	28.69	7.16	33.65	16.99	5.50	16.74	14.63	11.23	10.30	23.85
	1.1	25.03	6.35	29.37	14.88	4.79	14.47	12.81	9.74	8.82	20.96
	1.25	22.14	5.52	25.97	13.10	4.27	12.95	11.39	8.79	7.94	18.65
	1.41	19.38	4.80	22.54	11.34	3.69	11.10	9.90	7.59	6.87	16.21
	1.58	17.00	4.15	19.96	10.00	3.18	9.87	8.74	6.78	6.14	14.28
	1.77	15.05	3.80	17.61	8.78	2.81	8.67	7.65	5.95	5.47	12.57
	2	13.14	3.18	15.33	7.71	2.43	7.47	6.71	5.12	4.62	10.96
	2.24	11.62	2.85	13.59	6.82	2.22	6.62	6.02	4.61	4.08	9.75
	2.5	10.31	2.50	12.10	6.04	1.93	5.92	5.33	4.08	3.67	8.65
	2.82	9.09	2.20	10.64	5.22	1.68	5.18	4.67	3.62	3.26	7.62
	3.16	8.01	1.93	9.43	4.60	1.46	4.62	4.22	3.22	2.90	6.79
	3.54	7.18	1.77	8.41	4.13	1.28	4.09	3.69	2.85	2.57	5.98
	4	6.29	1.47	7.38	3.60	1.12	3.54	3.27	2.51	2.22	5.30
	4.48	5.56	1.36	6.60	3.27	0.99	3.19	2.90	2.25	2.03	4.72
	5	5.02	1.17	5.93	2.87	0.92	2.83	2.59	1.98	1.77	4.23
	5.64	4.46	1.05	5.25	2.56	0.86	2.53	2.26	1.77	1.60	3.74
	6.32	4.00	0.94	4.69	2.29	0.77	2.25	2.02	1.57	1.38	3.32
	7.1	3.58	0.82	4.20	2.07	0.67	2.01	1.82	1.43	1.24	2.97
	8	3.16	0.71	3.74	1.85	0.59	1.81	1.62	1.27	1.11	2.61
	8.96	2.84	0.64	3.34	1.64	0.50	1.60	1.45	1.12	1.00	2.34
	10	2.55	0.58	3.03	1.49	0.46	1.44	1.27	1.01	0.88	2.12
a		27.5	7	32.2	16.2	5.2	16	14.2	10.8	10	23.1
b		1.046	1.097	1.044	1.06	1.07	1.062	1.053	1.043	1.058	1.053
k ₁ -k ₃		109.6	40.3	127.5	71.1	25.3	65.6	48.9	40.7	42	101.6



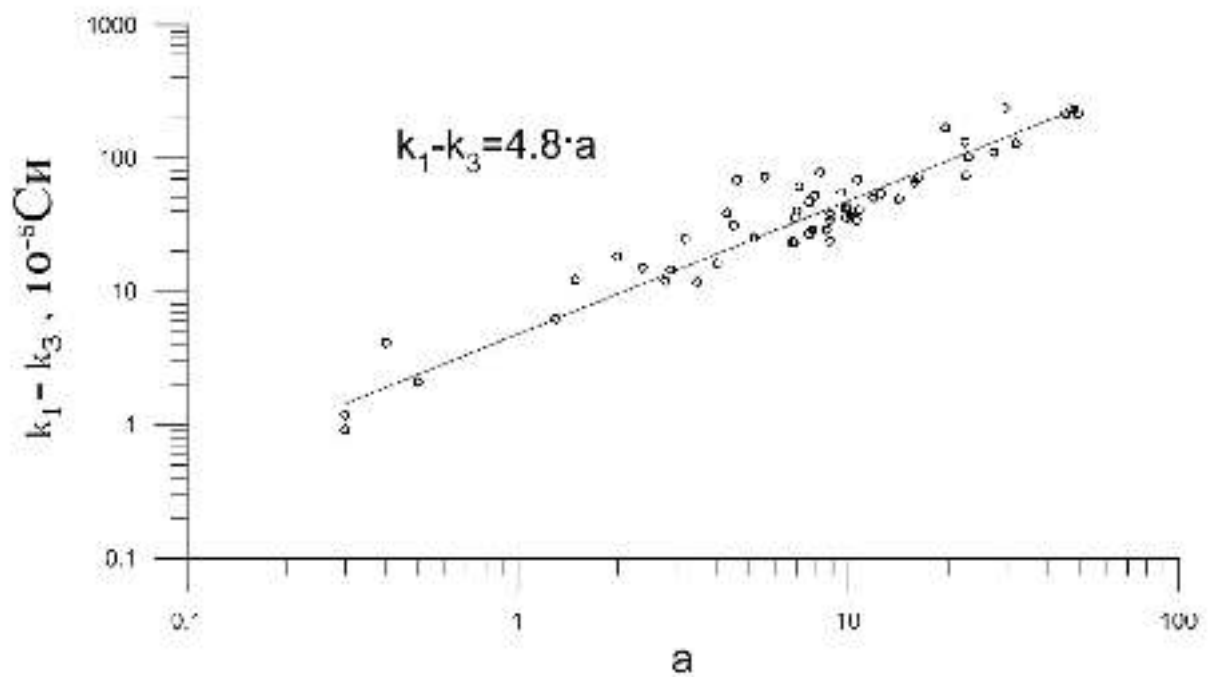
Приложение В.6 – Импульсные характеристики намагниченности образцов горна.

Приложение В.1 – Продолжение.

		№ образца							
t, мс		F20-2	F21-1	F22-1	F22-2	F22-4	F23-1	F25-2	F26-1
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	0.48	0.22	5.04	10.41	8.02	0.25	2.14	1.36
	1.1	0.41	0.21	4.11	8.90	6.92	0.17	1.75	1.12
	1.25	0.38	0.24	3.84	7.78	6.19	0.21	1.67	1.09
	1.41	0.25	0.15	3.22	6.68	5.28	0.13	1.38	0.91
	1.58	0.31	0.18	2.93	5.94	4.62	0.19	1.24	0.84
	1.77	0.23	0.18	2.47	5.18	3.99	0.11	1.06	0.74
	2	0.21	0.13	2.07	4.44	3.45	0.11	0.90	0.60
	2.24	0.19	0.08	1.84	3.91	3.06	0.11	0.84	0.50
	2.5	0.16	0.10	1.66	3.48	2.70	0.09	0.73	0.47
	2.82	0.14	0.06	1.44	2.98	2.40	0.09	0.65	0.41
	3.16	0.15	0.06	1.28	2.66	2.16	0.07	0.57	0.38
	3.54	0.11	0.08	1.12	2.36	1.81	0.06	0.50	0.32
	4	0.10	0.07	1.00	2.10	1.67	0.07	0.44	0.29
	4.48	0.10	0.06	0.88	1.84	1.47	0.08	0.39	0.25
	5	0.10	0.04	0.80	1.63	1.34	0.05	0.33	0.21
	5.64	0.09	0.02	0.74	1.49	1.15	0.04	0.30	0.16
	6.32	0.08	0.04	0.63	1.33	1.03	0.05	0.28	0.17
	7.1	0.06	0.02	0.57	1.18	0.93	0.05	0.26	0.14
	8	0.06	0.02	0.50	1.02	0.83	0.03	0.23	0.15
	8.96	0.04	0.02	0.44	0.95	0.75	0.01	0.20	0.13
10	0.05	0.04	0.40	0.83	0.63	0.01	0.18	0.12	
a		0.4	0.3	4.6	9.5	7.6	0.3	2	1.3
b		0.988	1.073	1.085	1.067	1.08	1.102	1.062	1.095
k ₁ -k ₃		4.1	1.2	68.9	55.8	46.7	0.9	18.3	6.3



Приложение В.7 – Импульсные характеристики намагниченности образцов горна.

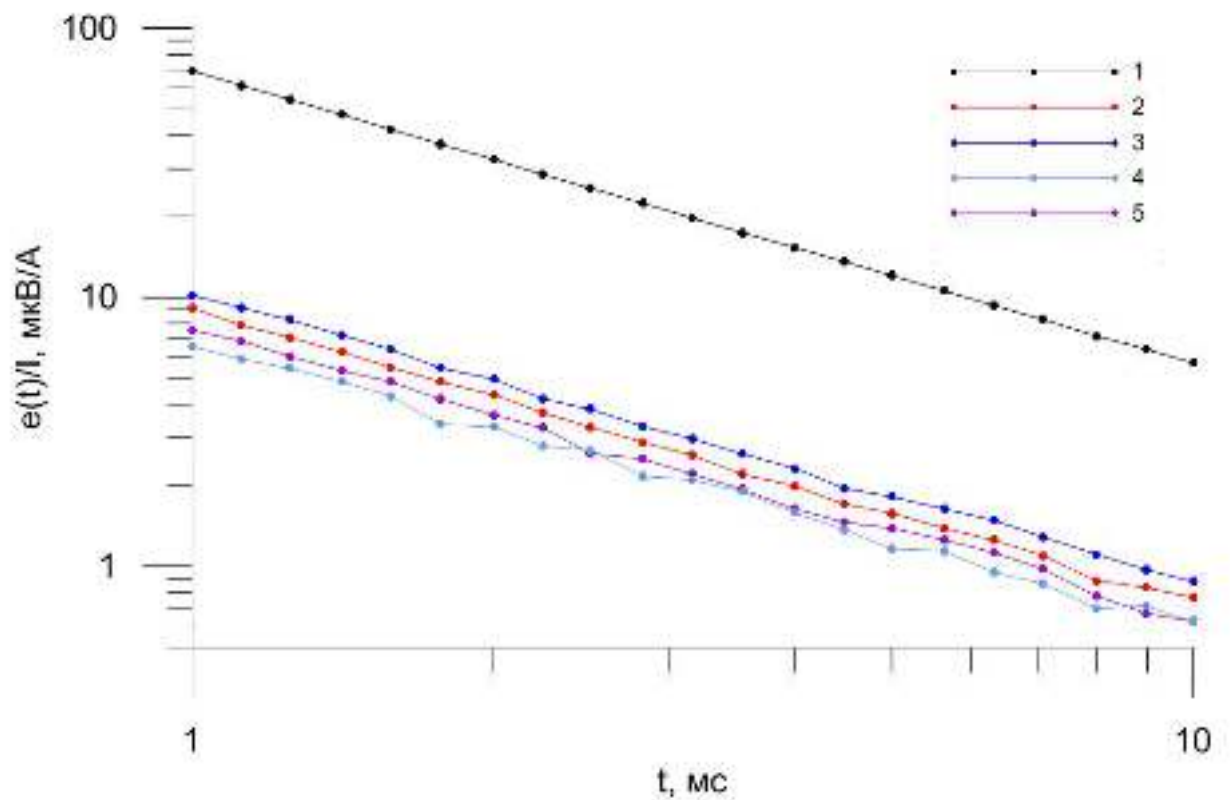


Приложение В.8 – Корреляция между результатами измерений образцов горна во временной и частотной областях.

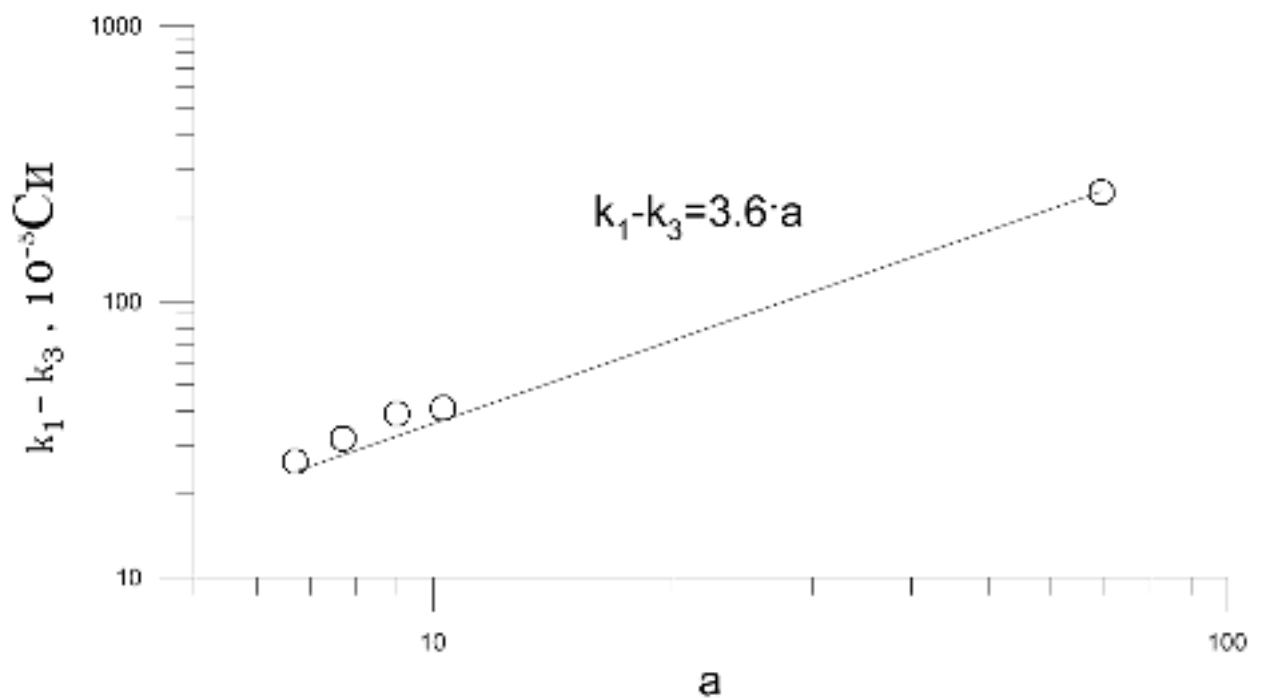
Приложение Г Образцы туфов

Приложение Г.1 – Результаты измерения магнитной вязкости образцов туфов во временной и частотной областях. Во временной области представлены импульсные характеристики намагниченности $U(t)/I$ полученные во временном интервале от 1 мс до 10 мс, а также параметры амплитуды a и показателя степени b аппроксимирующей их степенной функции. В частотной области представлена разность магнитных восприимчивостей $\kappa_1 - \kappa_3$, измеренных на частотах $f_1 = 976$ Гц, $f_3 = 15616$ Гц с помощью прибора AGICO Kappabridge MFK1.

	t, мс	№ образца				
		1	2	3	4	5
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	69.7	9.1	10.2	6.6	7.5
	1.1	62	7.9	9.2	5.9	6.9
	1.25	54.6	7.1	8.3	5.4	6
	1.41	47.9	6.3	7.2	4.9	5.3
	1.58	42.2	5.5	6.4	4.3	4.8
	1.77	37.2	4.9	5.5	3.4	4.2
	2	32.7	4.4	5	3.3	3.6
	2.24	28.7	3.7	4.2	2.8	3.3
	2.5	25.5	3.3	3.8	2.7	2.6
	2.82	22.4	2.9	3.3	2.2	2.5
	3.16	19.8	2.6	3	2.1	2.2
	3.54	17.5	2.2	2.6	1.9	1.9
	4	15.3	2	2.3	1.6	1.6
	4.48	13.6	1.7	1.9	1.4	1.5
	5	12.1	1.6	1.8	1.2	1.4
	5.64	10.6	1.4	1.6	1.1	1.3
	6.32	9.3	1.3	1.5	1	1.1
	7.1	8.3	1.1	1.3	0.9	1
	8	7.2	0.9	1.1	0.7	0.8
	8.96	6.4	0.8	1	0.7	0.7
	10	5.7	0.8	0.9	0.6	0.6
a		69.4	9	10.3	6.7	7.7
b		1.087	1.087	1.071	1.047	1.085
$\kappa_1 - \kappa_3$		247.7	39.1	40.9	26.2	31.6



Приложение Г.2 – Импульсные характеристики намагниченности кубических образцов туфов.



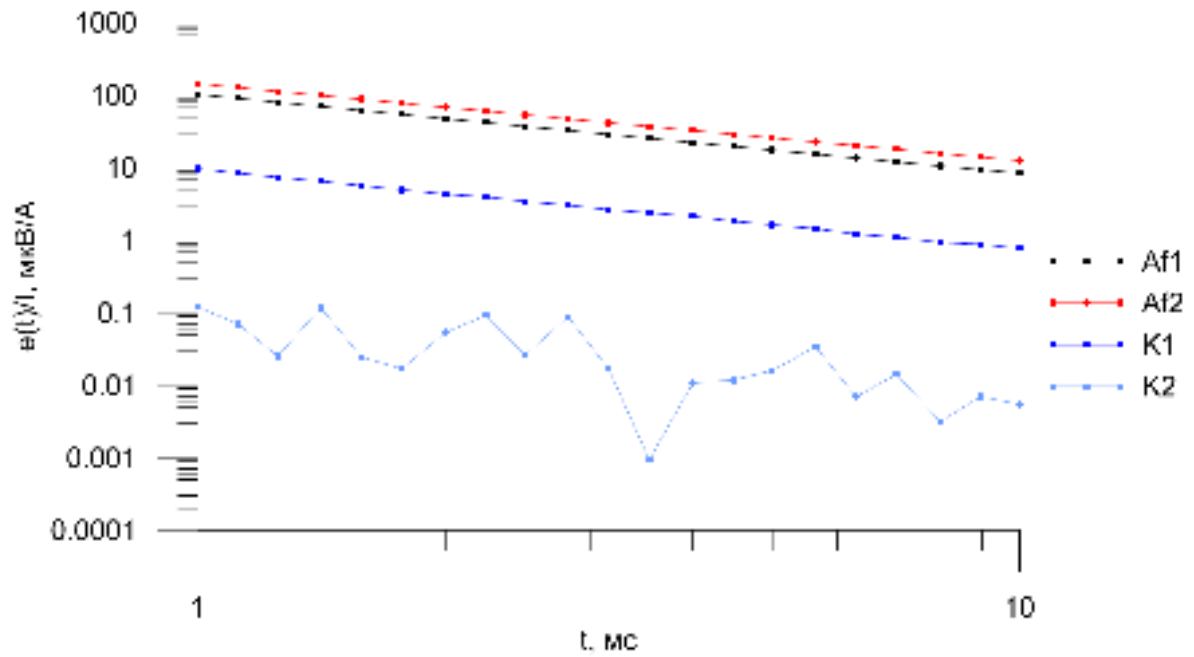
Приложение Г.3 – Корреляция между результатами измерений образцов туфов во временной и частотной областях.

Приложение Д

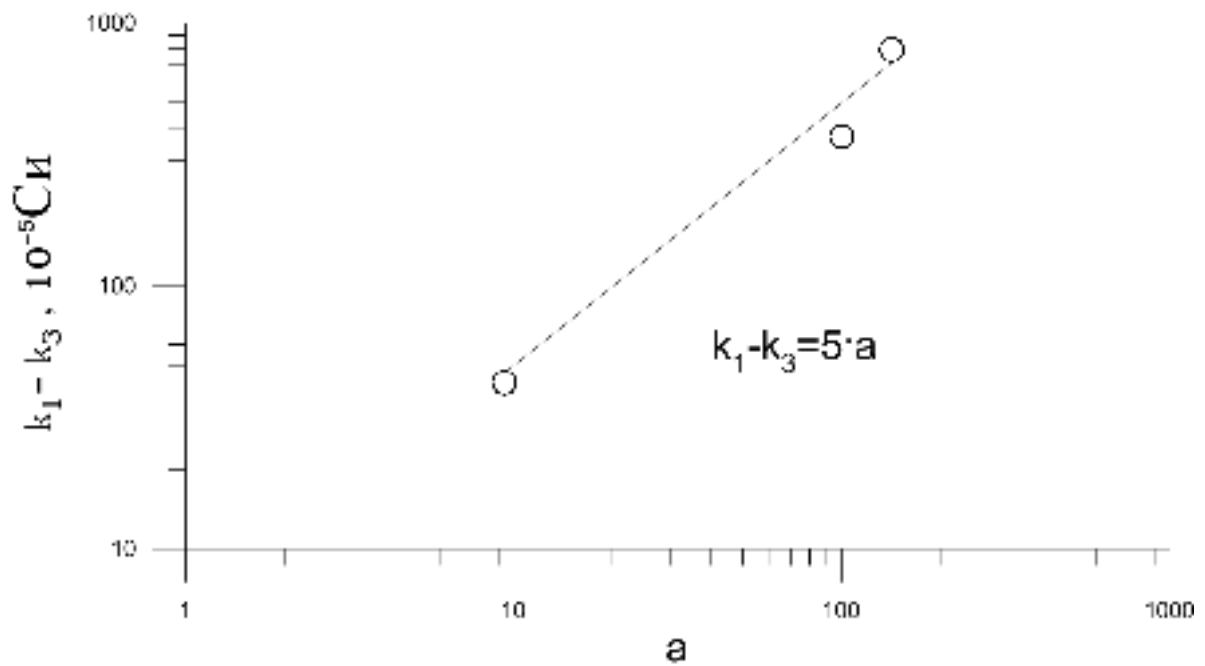
Образцы африканского песка и кирпичей

Приложение Д.1 – Результаты измерения магнитной вязкости образцов африканского песка (Af1, Af2) и кирпичей (K1, K2) во временной и частотной областях. Во временной области представлены импульсные характеристики намагниченности $U(t)/I$ полученные во временном интервале от 1 мс до 10 мс, а также параметры амплитуды a и показателя степени b аппроксимирующей их степенной функции. В частотной области представлена разность магнитных восприимчивостей $k_1 - k_3$, измеренных на частотах $f_1 = 976$ Гц, $f_3 = 15616$ Гц с помощью прибора AGICO Kappabridge MFK1.

	№ образца				
	t, мс	Af1	Af2	K1	K2
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	1	101.26	143.67	9.63	0.12
	1.1	89.25	127.21	8.33	0.07
	1.25	79.10	112.68	7.33	0.03
	1.41	69.14	99.08	6.48	0.12
	1.58	61.17	87.85	5.61	0.02
	1.77	53.87	77.37	4.93	0.02
	2	46.87	67.88	4.30	0.05
	2.24	41.51	60.35	3.93	0.09
	2.5	36.70	53.59	3.42	0.03
	2.82	32.29	47.01	3.02	0.09
	3.16	28.62	41.69	2.63	0.02
	3.54	25.19	36.98	2.37	0.00
	4	21.99	32.53	2.11	0.01
	4.48	19.55	28.84	1.82	0.01
	5	17.32	25.68	1.62	0.02
	5.64	15.28	22.65	1.44	0.03
	6.32	13.44	20.13	1.21	0.01
	7.1	11.90	17.88	1.09	0.01
	8	10.44	15.74	0.93	0.00
	8.96	9.29	13.99	0.87	0.01
	10	8.34	12.51	9.63	0.01
a		100.3	142.3	9.4	-
b		1.088	1.061	1.096	-
k ₁ -k ₃		369.7	794.4	42.8	0.5



Приложение Д.2 – Импульсные характеристики намагниченности образцов африканского песка и кирпичей.



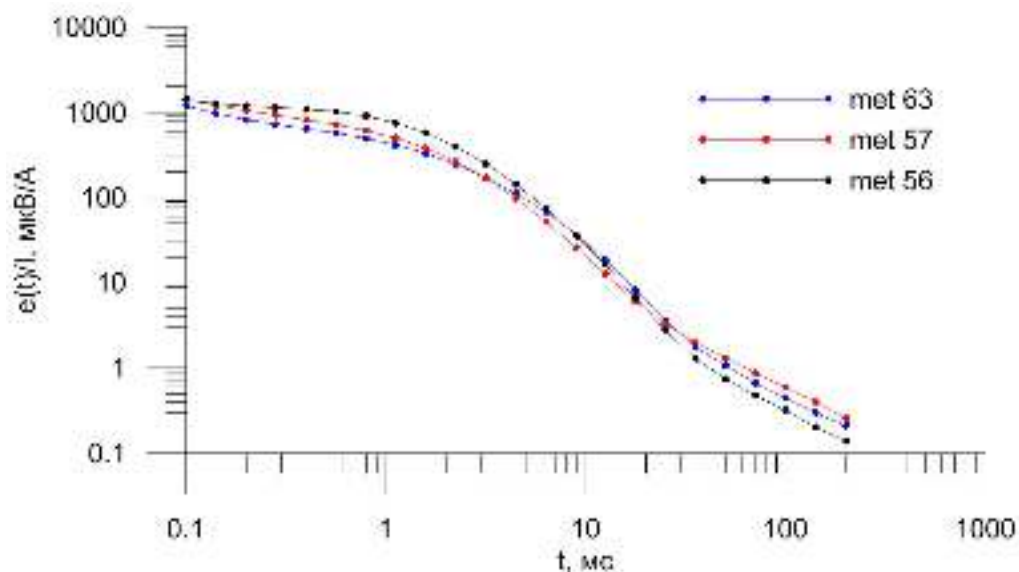
Приложение Д.3 – Корреляция между результатами измерений образцов африканского песка и кирпичей во временной и частотной областях.

Приложение Е

Магнитная фракция из отвалов археологического раскопа

Приложение Е.1 – Результаты измерения магнитной вязкости образцов Магнитная фракция из отвалов археологического раскопа во временной области. Представлены импульсные характеристики намагниченности $U(t)/I$ полученные во временном интервале от 0.1 мс до 200 мс.

		№ образца		
		met 56	met 57	met 63
U(t)/I измеренное на временных задержках, мкВ/А	t, мс			
	0.10	1391.88	1434.97	1178.87
	0.14	1258.62	1221.88	960.56
	0.20	1180.03	1056.83	811.16
	0.28	1133.37	930.68	711.01
	0.40	1086.90	822.20	632.79
	0.56	1014.87	720.19	562.73
	0.80	898.19	612.59	488.70
	1.12	746.59	501.63	411.61
	1.58	569.75	383.15	328.70
	2.24	394.31	267.53	243.96
	3.16	248.72	169.94	169.31
	4.48	141.24	97.83	109.81
	6.32	74.47	52.61	67.18
	8.96	35.70	25.98	36.28
	12.50	16.37	12.71	18.50
	17.70	6.62	6.12	8.17
	25.00	2.75	3.30	3.57
	35.40	1.28	1.99	1.74
	50.00	0.74	1.32	1.06
	70.80	0.47	0.88	0.66
	100.00	0.32	0.60	0.44
	141.00	0.20	0.40	0.29
	200.00	0.14	0.26	0.21



Приложение Е.2 – Импульсные характеристики намагниченности образцов магнитной фракции из отвалов археологического раскопа