

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Кожевников Николай Олегович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Филатов Владимир Викторович,
доктор физико-математических наук, профессор, Акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья» (АО «СНИИГГиМС»), гл. научный сотрудник отдела обобщения геологической информации и стратегического планирования;

Буддо Игорь Владимирович,
кандидат геолого-минералогических наук, ЗАО «Иркутское электроразведочное предприятие», ведущий геофизик.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ).

Защита состоится 7 апреля 2016 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 003.068.03, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:

просп. Ак. Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090,

факс: (383) 333-25-13, 330-28-07

e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/committee/Kamnev2015>

Автореферат разослан 17 февраля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.068.03
д.г.-м.н., доцент



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

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 превосходит 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 распоряжении исследователей имеется набор стандартных методов для обнаружения и диагностики ультрадисперсных магнитных частиц, однако 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.

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 зондирований 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 алмазодобывающего 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 погрешностей 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 намагничённости.

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 намагничённости с помощью индукционных систем обладают широким временным диапазоном и дополняют имеющийся набор петромагнитных методов, используемых в магнитной granulometрии.

Результаты математического моделирования показали, что импульсные характеристики намагничённости 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 журнале, входящем в перечень изданий ВАК Российской Федерации.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Во введении определены объект, актуальность, цель, научная задача, фактический материал исследования, описана аппаратура, сформулированы основные полученные результаты, теоретическая и практическая значимость, научная новизна работы, личный вклад автора.

Глава 1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ, ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ

В начале главы описывается физика явления. Согласно теории Нееля [Neel, 1949], если однодоменная магнитная частица достаточно мала, или температура окружающей среды достаточно велика, то направление магнитного момента частицы испытывает тепловые флуктуации, вплоть до инверсии вдоль оси лёгкого намагничивания. Для описания этого эффекта Неель ввёл понятие характерного времени релаксации намагниченности τ :

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

где K – постоянная анизотропии, k – постоянная Больцмана. Поскольку в геологических средах присутствуют частицы разного размера, изменение намагниченности во времени зависит от распределения суперпарамагнитных частиц по размерам. Согласно данным электронной микроскопии распределение объёмов частиц геологических сред нередко близко к логнормальному:

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

где V_m – средний объём частиц, σ – среднеквадратичное отклонение логарифмов объёмов. В общем случае оценка распределения размеров частиц и его параметров представляет непростую задачу, поэтому часто прибегают к его приближенному описанию. Одним из распространённых приближений является функция Фрелиха [Fannin, Charles, 1995], в которой в качестве переменной используется τ . Эта функция, $P(\ln \tau)$, равна $1/\ln(\tau_2/\tau_1)$ внутри и нулю – вне интервала $\tau_1 < \tau < \tau_2$. При описании распределения

размеров частиц функцией Фрëлиха изменение намагниченность описывается выражением [Трухин, 1973]:

$$J(t) \approx const \pm \frac{1}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \ln(t).$$

Далее в главе приводится краткая характеристика методов исследования магнитной вязкости: температурных (ZFC, FC), в частотной и временной областях, Мёссбауэровской спектроскопии.

В заключительной части главы описываются проявления магнитной вязкости в геофизическом методе переходных процессов (МПП), где они обычно считается фактором, осложняющим интерпретацию данных МПП в терминах «нормальной» электропроводности. Вместе с тем, проявления магнитной вязкости в МПП содержат информацию о суперпарамагнитных частицах, которая может представлять самостоятельный интерес. Таким образом, измерения импульсных характеристик намагниченности во временной области 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

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 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 результатов измерений параметров магнитной вязкости с помощью одного из известных методов.

В качестве метода для сравнения был выбран основанный на измерении магнитной восприимчивости на нескольких частотах. Сначала приводится описание метода измерений, важнейшие понятия, определения. Проявления магнитной вязкости в частотной области характеризует разность магнитной восприимчивости на низкой (lf) и высокой (hf) частотах $\Delta\kappa = \kappa_{lf} - \kappa_{hf}$ и фактор $FD = 100 \cdot (\kappa_{lf} - \kappa_{hf}) / \kappa_{lf}$. Последний описывает относительный вклад суперпарамагнитных частиц в суммарную магнитную восприимчивость.

Далее даётся характеристика аппаратуры для исследования магнитной вязкости в частотной области (мосты Bartington MS2 и AGICO Kappabridge

МФК1), после чего приводится описание образцов, включая: Витимские базальты; туфы Малобугубинского района (Западная Якутия); фрагменты сыродутного горна; магнитную фракцию из отвалов археологического раскопа; африканский песок; кирпичи.

Изучение магнитной вязкости в частотной области проведено в два этапа. На основе результатов первого этапа приведено экспериментальное и теоретическое исследование погрешности измерений. Поскольку параметры Δk и FD находятся путём вычитания двух близких величин, погрешность определения этих параметров может достигать десятков и даже сотен процентов. Анализ источников погрешности позволил предложить рекомендации по усовершенствованию методики измерений.

В заключительной части главы приведены результаты измерения Δk и фактора FD образцов в частотной области с использованием усовершенствованной методики (второй этап).

Глава 3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В вводной части главы рассмотрены основные моменты исследования магнитной вязкости во временной области. Описываются преимущества и недостатки измерения переходной характеристики намагниченности и выгодные особенности исследования импульсной характеристики намагниченности.

Далее описывается лабораторная установка для измерения импульсной характеристики намагниченности (рисунок 1). Для возбуждения и регистрации переходных процессов использовалась аппаратура FastSnap для метода переходных процессов. Аппаратура состоит из коммутатора тока и измерителя, управляемого компьютером через адаптер линии связи. Коммутатор тока формирует в генераторной катушке прямоугольные импульсы тока чередующейся полярности, разделенные паузой. ЭДС переходного процесса измеряется в приёмной обмотке в паузах между токовыми импульсами. Для измерения импульсной характеристики намагниченности были изготовлены генераторно-измерительные катушки. Одни из первых результатов измерений импульсных характеристик намагниченности цилиндрических образцов базальтов показаны на рисунке 2 а. Начальное время измерений t_1 определялось собственным переходным процессом 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 2 а, $t_2 \approx 100 - 300$ мс. Таким образом, временной диапазон измерений $t_1 - t_2$ перекрывал три порядка.



Рисунок 1 – Установка для измерения импульсных характеристик намагничности: 1 – коммутатор тока; 2 – измеритель; 3 – адаптер линии связи; 4 – аккумулятор, питающий генераторную обмотку; 5, 6 – катушки

Для всех образцов приведенная к току ЭДС $e(t)/I$, индуцируемая в приемной катушке, описывалась степенной зависимостью $e(t)/I = a \cdot t^{-b}$, где $b \approx 1$. Такой характер убывания ЭДС не может быть следствием затухания вихревых токов или вызванной поляризации и с большой вероятностью свидетельствует о том, что переходный процесс порождается релаксацией намагничности суперпарамагнитных частиц.

На рисунке 2 б показано сравнение параметров, характеризующих магнитную вязкость во временной (начальное значение импульсной характеристики намагничности – a) и частотной (Δk) областях. Как можно видеть, между этими параметрами наблюдается линейная корреляция: большинство экспериментальных точек располагаются вблизи прямой $\Delta k = 10 \cdot a$, показанной штриховой линией.

Первые эксперименты выявили некоторые проблемы. Система многовитковых генераторной и приёмной обмоток имела длительный собственный переходный процесс (≈ 1 мс). Кроме этого, измерения на небольших кубических образцах (стандартных в палеомагнитных исследованиях), для которых была изготовлена плотно облегающая образец кубическая катушка, показали, что большинство импульсных характеристик намагничности образцов базальтов (1) сложно различить на уровне шумов.

Лучших результатов удалось добиться за счет изменения геометрии измерительной системы. Как и раньше, приёмная катушка плотно облегла образец, однако, в отличие от предшествовавших версий, помещалась внутри

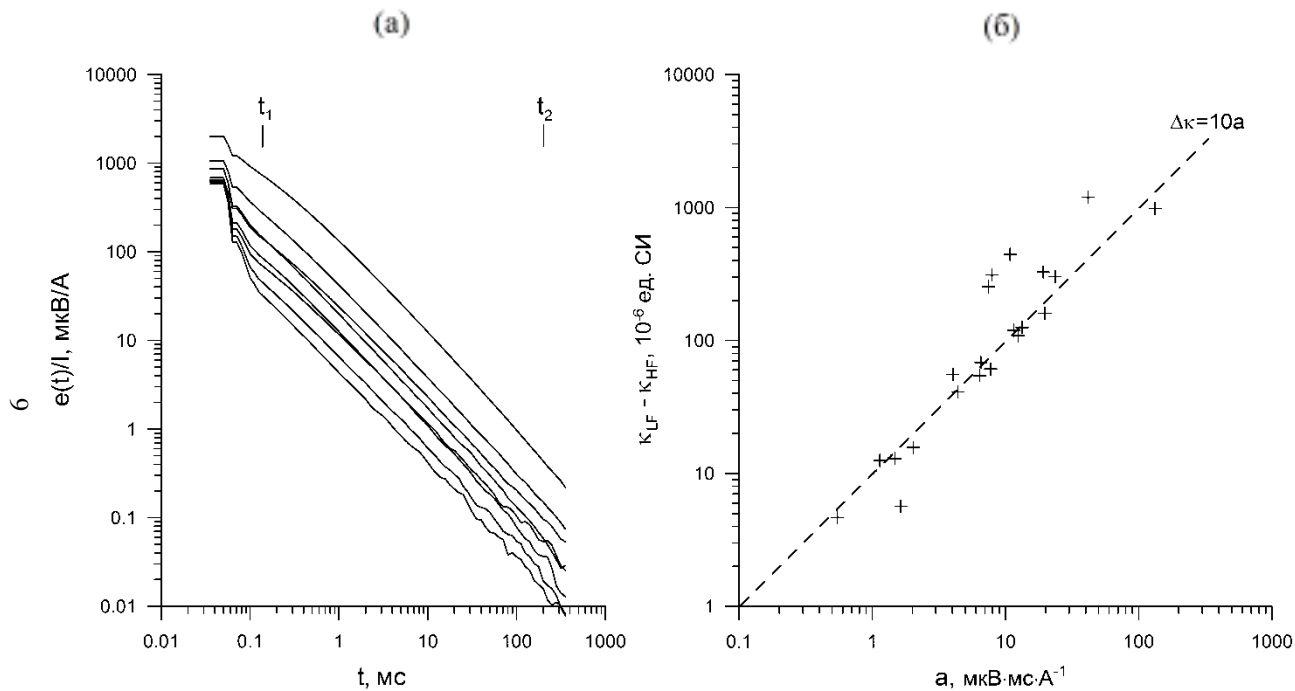


Рисунок 2 – Исследование магнитной вязкости образцов базальтов: а) импульсные характеристики намагниченности; б) корреляция между результатами измерений во временной (a) и частотной ($\kappa_{lf} - \kappa_{hf}$) областях

генераторной катушки большого размера. Зазор между генераторной и приёмной обмотками не позволял образцу нагреваться даже при длительных измерениях, что позволило увеличить количество накоплений сигнала, не беспокоясь о температурном дрейфе. Использование специально подобранных шунтов также способствовало дополнительному расширению временного диапазона измерений.

Улучшенная методика измерений позволила исследовать небольшие кубические образцы с чувствительностью, которую ранее удавалось достичь при изучении больших цилиндрических образцов. Типичные результаты измерений представлены на рис. 3. Примечательно, что показатель степени аппроксимирующих степенных функций часто отличен от единицы, причём эти отличия превышают погрешность определения параметров аппроксимации. Показатель степени менялся также в зависимости от образца и от временного диапазона аппроксимации. Это давало основания предположить, что лабораторная индукционная установка чувствительна к параметрам распределения размеров мелких магнитных частиц, которое отлично от соответствующего функции Фрëлиха ($e(t)/I = a \cdot t^{-1}$).

Таким образом, исследования магнитной вязкости с помощью индукционной системы показали, что параметр a демонстрирует сильную корреляцию с частотно-зависимой магнитной восприимчивостью $\Delta\kappa$, которая часто используется для оценки содержания суперпарамагнитных частиц. Это дает основания полагать, что импульсные индукционные

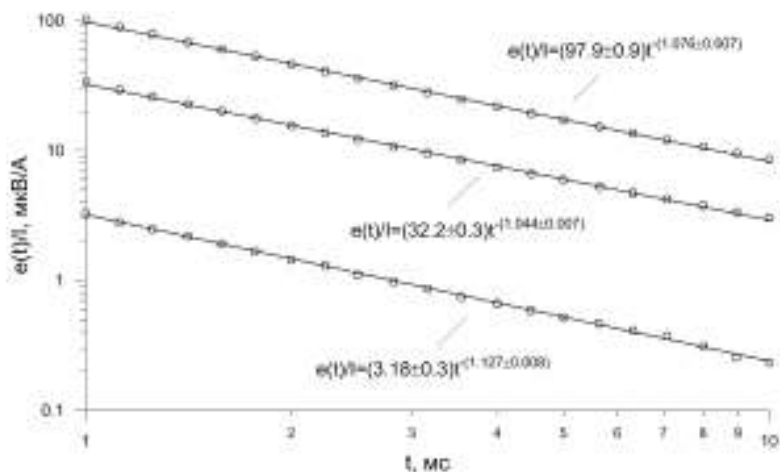


Рисунок 3 – Импульсные характеристики намагниченности кубических образцов из стенки древнего сырродутного горна в Приольхонье

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

В начале главы описывается математическое моделирование импульсных характеристик намагниченности с различными параметрами логнормального распределения объёмов. Показано, что импульсные характеристики намагниченности, рассчитанные на основе логнормального распределения объёмов суперпарамагнитных частиц, близки к экспериментальным (показатель степени аппроксимирующих степенных функций отличен от единицы, меняется в зависимости от параметров распределения и зависит от временного диапазона аппроксимации). Таким образом, по сравнению с распределением размеров частиц соответствующим распределению Фрëлиха логнормальное распределение лучше объясняет экспериментальные данные.

Далее приводится описание численного эксперимента по восстановлению параметров распределения (σ и V_m) модельных импульсных характеристик. Для решения обратной задачи была написана программа на языке MATLAB. При отыскании параметров минимизировалась целевая функция:

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

где $u(t_n)$ – квазиэкспериментальная синтетическая импульсная характеристика, $v(t_n)$ – импульсная характеристика, рассчитанная при текущих параметрах σ и V_m , t_n – временные задержки измерений ($n = [1 \dots N]$). Сначала подбирались параметры синтетической импульсной характеристики, на которую был наложен нормальный шум с $\sigma_{ш} = 1\%, 3\%$. В процессе лабораторных измерений почти для всех образцов удавалось зарегистрировать переходный процесс на 1-2 порядка выше уровня шумов во временном диапазоне от 1 мс до 10 мс. Поэтому именно такой временной диапазон и был выбран при решении обратной задачи. Для отыскания оптимального решения строилась карта целевой функции, область минимума на которой оказалась настолько широкой, что полученный результат нельзя было признать удовлетворительным. Как выяснилось, для сужения области эквивалентности необходимо понизить $\sigma_{ш}$ до 0.1%. В настоящее время возможность измерения импульсных характеристик с такой точностью представляется маловероятной. Поэтому был рассмотрен другой вариант снижения неоднозначности, а именно - расширение временного диапазона, в котором проводился расчет и, соответственно, инверсия квазиэкспериментальных импульсных характеристик (0.1 мс – 100 мс). В таком диапазоне обычно удается зарегистрировать импульсные

характеристики намагниченности образцов с высоким содержанием суперпарамагнитных частиц. На рисунке 4 изображена карта целевой функции, рассчитанной в указанном выше временном диапазоне при $\sigma_{ш} = 1\%$. На рисунке видна небольшая область возможных параметров логнормального распределения, близких к истинным. Это свидетельствует о принципиальной возможности оценки параметров σ и V_m по экспериментальным импульсным характеристикам намагниченности в рамках модели логнормального распределения.

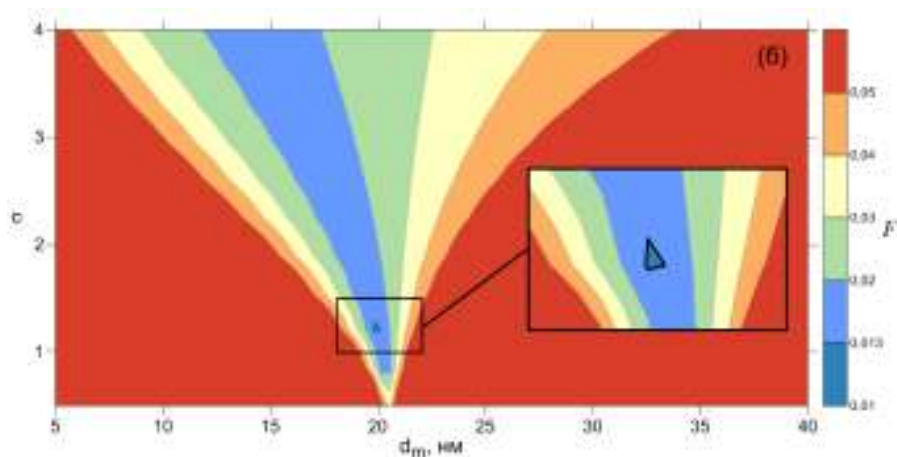


Рисунок 4 – Карта целевой функции (построенной для модельной импульсной характеристики намагниченности с параметрами логнормального распределения $\sigma=1$, $d_m=20$ нм) рассчитанной во временном диапазоне 0.1 мс – 100 мс, с наложенным нормальным шумом с $\sigma_{ш}=1\%$

Рисунок 5 иллюстрирует погрешность инверсии синтетических импульсных характеристик. Для её определения был проведён численный эксперимент. Внутри области $\sigma \in [0.5; 4]$, $d_m \in [5; 30]$, с шагом $\sigma = 0.01$ и $d_m = 0.1$ нм отыскивались параметры распределения для 500 квазиэкспериментальных импульсных характеристик, осложненных 1% нормальным шумом. Целевая функция минимизировалась с помощью алгоритма Нелдера-Мида [Nelder, 1965]. Набор подобранных параметров использовался для статистической оценки их среднеквадратичного отклонения от истинных значений.

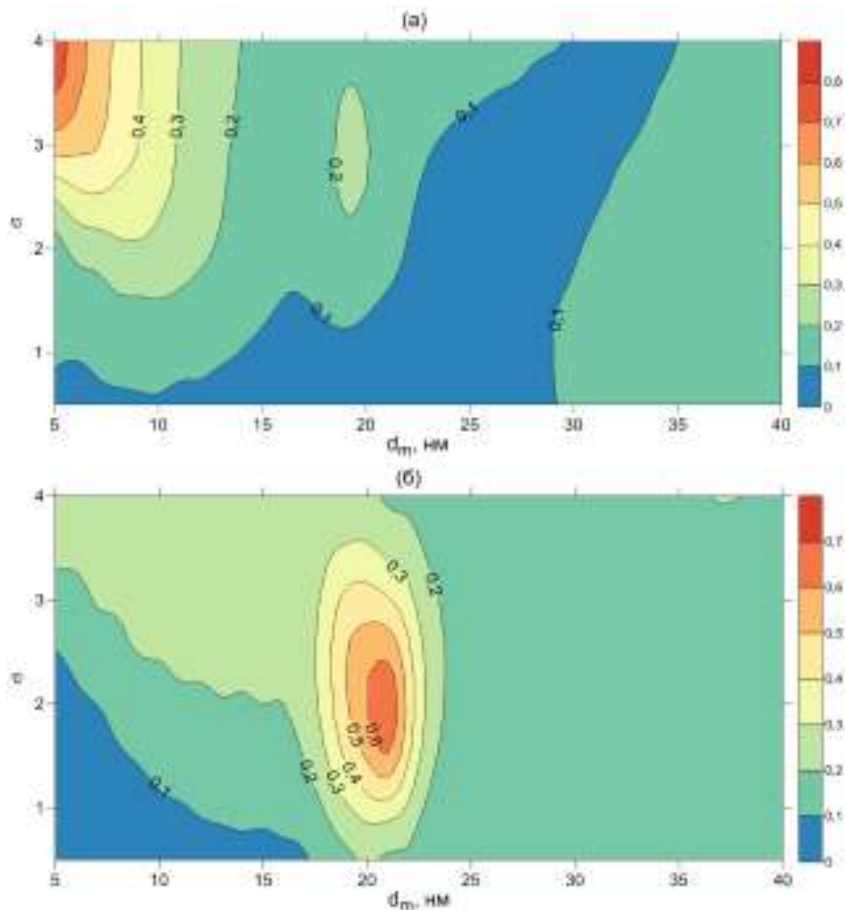


Рисунок 5 – Относительное среднеквадратичное отклонение подобранных значений d_m (а) и σ (б), в зависимости от начальных параметров модельных импульсных характеристик

Из рисунка видно, при таком уровне шума d_m подбирается с погрешностью 10-20% практически во всей области параметров. Для широких распределений ($\sigma > 3$) с малым d_m погрешность вырастает до 50-80%. Параметр σ в большинстве случаев подбирается с погрешностью 10-20%, однако вблизи $d_m = 22$ нм, $\sigma = 2$ погрешность может достигать 60%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная лабораторная индукционная установка обеспечивает высокую чувствительность и низкую погрешность измерений импульсных характеристик намагничённости. Сравнительный анализ результатов измерений образцов во временной и частотной областях показал, что предложенная 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 чувствительна к распределению объёмов суперпарамагнитных частиц. По сравнению с распределением объёмов, соответствующим функции Фрëлиха, логнормальное распределение объёмов частиц лучше объясняет экспериментальные данные.

С помощью математического моделирования продемонстрирована принципиальная возможность оценивать параметры логнормального распределения по импульсным характеристикам намагничённости. С учётом определённой экспериментальной точности измерений были рассчитаны погрешности определения параметров распределения.

В дальнейшем предполагается расширить временной диапазон и снизить погрешности измерений, что, как ожидается, позволит перейти к оценке параметров распределений ансамблей частиц в реальных геологических средах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

1. 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.

2. **Камнев, Я.К.** Импульсная характеристика вязкой намагничённости 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.

Другие значимые публикации:

3. 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 – 2012 – Т. 34. – № 4. – С. 137-149.

4. **Камнев, Я.К.** Измерение магнитной вязкости во временной области лабораторной индукционной установкой / **Я.К. Камнев**, Н.О. Кожевников, Г.Г. Матасова // Материалы VIII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 10-20 апр. 2012г.) «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых». В 2т. Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 38-43.

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

6. **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, 2013. – С. 197-202.

7. **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, 2013. – 3 с. – Режим доступа: <http://emf.ru/ems2013/section7/Камнев.pdf>, свободный.

8. **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. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 4 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2014 – С. 101-105.

9. **Камнев, Я.К.** Оценка параметров распределения размеров суперпарамагнитных частиц по импульсным характеристикам намагниченности: численный эксперимент / **Я.К. Камнев**, Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф.

«Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015 – С. 86-90.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано к печати 21.01.2016

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура «Таймс»

Печ.л. 0,9. Тираж 100. Зак. № 141

ИНГГ СО РАН, ОИТ 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3