

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Грачев Роман Александрович**

**Лабораторное моделирование низкотемпературного  
окисления титаномагнетита для решения  
палеомагнитных задач**

Специальность 1.6.9. Геофизика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Диссертация подготовлена на кафедре физики Земли физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Максимочкин Валерий Иванович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Официальные оппоненты: **Безаева Наталья Сергеевна**,  
доктор физико-математических наук,  
Институт геохимии и аналитической химии  
им. В.И. Вернадского РАН,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
метеоритики и космохимии

**Лубнина Наталия Валерьевна**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
профессор кафедры динамической геологии геологического факультета

**Костеров Андрей Александрович**,  
кандидат физико-математических наук,  
Санкт-Петербургский государственный  
университет, физический факультет,  
доцент кафедры физики Земли

Защита состоится 18 июня 2026 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет, аудитория 5-52.

E-mail: [diss.sov.016.3@org.msu.ru](mailto:diss.sov.016.3@org.msu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке отдел диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3926>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» мая 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ.016.3,  
кандидат физико-математических наук

Колесов С. В.

## Общая характеристика работы

Диссертация посвящена проблеме палеомагнитной информативности горных пород, в которых основным магнитным минералом является титаномагнетит, претерпевший однофазное окисление. *Палеомагнитная информативность* — это совокупная информация о пригодности остаточной намагниченности породы для определения направления и/или напряжённости древнего магнитного поля Земли.

### Актуальность темы и степень её разработанности.

Магнитное поле Земли является одной из фундаментальных характеристик нашей планеты, а восстановление истории его изменений необходимо для изучения процессов во внешнем ядре, реконструкции эволюции геодинамо и тектонических движений литосферных плит, а также для выяснения условий формирования земной коры.

Поскольку прямые наблюдения параметров геомагнитного поля охватывают лишь последние несколько столетий, важным источником сведений о магнитном поле Земли в геологическом прошлом служат палеомагнитные данные по изверженным породам, в которых информация о направлении и напряжённости древнего магнитного поля сохраняется в термоостаточной намагниченности (TRM) ферромагнитных минералов.

Во многих изверженных породах, особенно в базальтах, главным носителем остаточной намагниченности является титаномагнетит. В природных условиях этот минерал нередко подвергается однофазному окислению, которое сопровождается изменением его магнитных свойств, спектра блокирующих температур и формированием химической остаточной намагниченности (CRM) [1–3]. Химическое перемагничивание искажает исходную «палеомагнитную запись» первичной TRM и тем самым затрудняет определение как палеонаправления, так и палеонапряжённости [4; 5].

Несмотря на значительное число работ по окислению титаномагнетита и свойствам CRM, остаются недостаточно разработанными вопросы диагностики и разделения первичной TRM и вторичной CRM в составе естественной остаточной намагниченности (NRM) однофазно-окисленного титаномагнетита, особенно при перекрытии их спектров деблокирующих температур и коэрцитивных сил [A1–A3]. Недостаточно изучено также влияние однофазного окисления титаномагнетита на точность определения палеонапряжённости методом Телье–Кое в случаях, когда вторичная CRM, формирующаяся при низкотемпературном окислении в магнитном поле, накладывается на первичную TRM [4–7]. Кроме того, теоретические представления о релаксационных процессах, лежащих в основе химического и термохимического намагничивания, в настоящее время наиболее полно разработаны лишь для невзаимодействующих однодоменных зёрен, тогда как для неоднородных зёрен эти процессы изучены значительно слабее, поэтому новые экспериментальные данные по химическому намагничиванию природных ферромагнетиков представляют особый интерес [8; 9].

В качестве **объекта исследования** выбран ансамбль зёрен природного титаномагнетита в базальте П72-4 Красного моря.

**Предметом исследования** являются процессы однофазного окисления титаномагнетита в базальте П72-4, формирование химической остаточной намагниченности и возможность определения по первичной термоостаточной намагниченности титаномагнетита величины и направления древнего магнитного поля в условиях прогрессирующего однофазного окисления в магнитном поле.

**Целью** работы является установление влияния однофазного окисления титаномагнетита в магнитном поле на палеомагнитную информативность базальтов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выбрать объект исследования — изверженную горную породу, в которой основным носителем магнитных свойств является ансамбль зёрен титаномагнетита без признаков однофазного окисления.
2. Выполнить комплексную магнито-минералогическую характеристику исходного состояния объекта исследования.
3. Разработать и апробировать экспериментальные методики контролируемого однофазного окисления титаномагнетита в слабом магнитном поле, воспроизводящие природные сценарии постмагматических преобразований в лабораторных условиях.
4. Экспериментально установить закономерности изменения магнитных характеристик титаномагнетита в зависимости от длительности термического воздействия и, соответственно, степени окисления.
5. Установить диагностические признаки присутствия вторичной химической остаточной намагниченности и исследовать её свойства.
6. Оценить влияние однофазного окисления титаномагнетита в магнитном поле на результаты определения напряжённости магнитного поля методом Телье–Кое.
7. Выполнить расчёт статистических параметров, характеризующих достоверность определений напряжённости магнитного поля методом Телье–Кое по термоостаточной намагниченности.

**Научная новизна:** впервые разработана и апробирована методика лабораторного моделирования низкотемпературного однофазного окисления природного титаномагнетита в результате вторичного теплового воздействия, связанного с внедрением магмы, позволяющая воспроизводить состояния с наложением вторичной химической остаточной намагниченности на ранее сформированную термоостаточную намагниченность. Для базальта П72-4 Красного моря впервые показано, что химическая остаточная намагниченность, формирующаяся при однофазном окислении титаномагнетита выше точки Кюри исходной фазы, в экспериментах Телье–Кое приводит к занижению расчётного значения магнитного поля относительно поля

её формирования, причём величина этого занижения уменьшается с ростом степени окисления. Впервые установлено, что надёжность определения величины древнего магнитного поля методом Телье–Кое по базальтам, содержащим однофазно-окисленный титаномагнетит, зависит как от степени окисления ( $Z$ ), так и от ориентации магнитного поля, действовавшего во время окисления, относительно направления первичной термоостаточной намагниченности. Если это поле близко по направлению к первичной TRM, то при умеренных степенях окисления ( $Z \leq 0.5$ ) расчётное поле  $B_{\text{calc}}$  остаётся близким к полю формирования TRM (50 мкТл); при перпендикулярной ориентации поля результаты определения палеонапряжённости становятся ненадёжными. Впервые показано, что диагностика однофазно-окисленного титаномагнетита и присутствия вторичной химической компоненты в остаточной намагниченности может быть осуществлена по совокупности признаков, включая гомогенизацию магнитной фазы, проявляющуюся при нагреве в инертной среде аргона, и особенности поведения остаточной намагниченности при терморазмагничивании и размагничивании переменным полем.

**Практическая значимость** работы состоит в повышении надёжности палеомагнитных определений по остаточной намагниченности горных пород, где за остаточную намагниченность отвечает титаномагнетит на различных стадиях окисления. Полученные результаты могут быть использованы при интерпретации палеомагнитных данных по базальтам океанической коры, рифтовых зон и магматических провинций, где низкотемпературные окислительные процессы распространены.

**Методология и методы исследования.** В работе использован комплекс взаимодополняющих методов петромагнетизма, палеомагнетизма и магнитной минералогии, включающий измерение естественных магнитных характеристик образцов, термомагнитный анализ в различных газовых средах, измерение петель магнитного гистерезиса и производных параметров, ступенчатое размагничивание температурой и переменным магнитным полем, модифицированный метод Телье–Кое, а также статистическую обработку и регрессионный анализ экспериментальных зависимостей. Для контроля фазового состава, морфологии, доменной структуры и химического состава магнитных зёрен использованы методы порошковой рентгенодифракции, сканирующей электронной микроскопии, микронзондового анализа. Разработаны авторские методики лабораторного моделирования постмагматических преобразований титаномагнетита.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Химическая остаточная намагниченность, образованная при однофазном окислении титаномагнетита выше точки Кюри исходной фазы, имеет сходный с термоостаточной намагниченностью спектр температур деблокирования, а метод Телье–Кое даёт заниженное поле её формирования.

2. Химическая намагниченность однофазно-окисленного титаномагнетита в базальтах устанавливается по наличию максимума на кривой размагничивания и снижению температуры Кюри при нагреве в инертной среде.
3. Методика лабораторного моделирования однофазного окисления титаномагнетита, воспроизводящая формирование химической намагниченности на фоне частично сохраняющейся первичной термоостаточной намагниченности.
4. Палеонапряженность, определенная по остаточной намагниченности однофазно-окисленного титаномагнетита, зависит от направления магнитного поля, действовавшего в процессе окисления: при параллельной ориентации метод Телье–Кое дает надежное определение поля при степени окисления меньше 0.5, при перпендикулярной ориентации — определения поля ненадежны.

**Достоверность** результатов обеспечивается использованием серии образцов-дублей с малым разбросом исходных магнитных характеристик, воспроизводимостью экспериментальных протоколов, применением нескольких независимых методов контроля магнитоминералогических изменений, а также согласованностью данных, полученных петромагнитными, палеомагнитными и магнитоминералогическими методами. Достоверность выводов подтверждается сопоставлением результатов, полученных на разных стадиях экспериментов, использованием стандартных процедур контроля в методе Телье–Кое и статистической обработкой экспериментальных данных.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на 14 российских и международных научных конференциях, а именно: XXIV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов–2017» (Москва, 2017), Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017, Москва, 2017), International conference on paleomagnetism and rock magnetism (Казань, 2017), IV Международной научной школе молодых учёных «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2018), школах-конференциях «Проблемы Геокосмоса» (Петергоф/Санкт-Петербург, 2018, 2021, 2022), European Geosciences Union General Assembly (Вена, 2021, 2022), Международной конференции «Ломоносовские чтения» (Москва, 2023, 2024) и Всероссийской школе-конференции «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород» (Казань, 2025). Материалы диссертации также обсуждались на научных семинарах кафедры физики Земли физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (2018–2026).

**Личный вклад.** Все результаты, изложенные в диссертации, являются оригинальными и получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии. Личный вклад автора состоит в постановке и проведении лабораторных экспериментов, разработке и модернизации экспериментальной базы лаборатории геомагнетизма кафедры физики Земли, в выполнении магнитных измерений, обработке результатов, формулировке

основных выводов и защищаемых положений диссертационной работы. В работах, выполненных в соавторстве, вклад автора был определяющим.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 4 научные статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 1.6.9. Геофизика.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Объём диссертации составляет 128 страниц, включая 30 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 129 наименований.

## Содержание работы

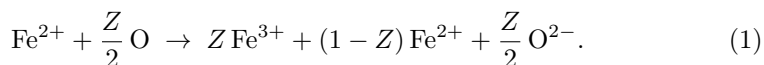
Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, определяются объект и предмет исследования, формулируются цель и задачи работы, раскрываются научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также приводятся положения, выносимые на защиту.

### Глава 1. Литературный обзор.

**Первая глава** посвящена анализу современных представлений о фазовых, структурных и магнитных свойствах титаномагнетита, механизмах его окисления и роли этих процессов в формировании и преобразовании его палеомагнитного сигнала.

**В разделе 1.1** рассмотрены фазовые, структурные и магнитные свойства титаномагнетита как твёрдого раствора в системе магнетит–ульвошинель. Показано, что его магнитные характеристики определяются не только химическим составом, но и особенностями катионного распределения в шпинельной структуре [10; 11]. Рассмотрены основные вклады в магнитную анизотропию — магнитокристаллический, магнитоупругий и анизотропия формы, — и их влияние на устойчивость остаточной намагниченности. Проанализированы доменные состояния титаномагнетита, их зависимость от размера зёрен, состава, внутренних напряжений и степени окисления.

**В разделе 1.2** рассмотрены основные типы окислительных преобразований титаномагнетита. Показано, что низкотемпературное однофазное окисление является начальной стадией вторичных окислительных преобразований титаномагнетита. В форме, предложенной О'Рейли [12], этот процесс может быть записан следующим образом, где параметр  $Z$  характеризует степень однофазного окисления:



Рассмотрены минералогические и магнитные последствия однофазного окисления, включая изменения температуры Кюри, намагниченности насыщения, коэрцитивных параметров и спектров размагничивания. Показано, что формирующаяся при этом CRM может частично или полностью перекрывать первичную TRM, осложняя интерпретацию палеомагнитных данных [1; 6; 13; 14]. Отдельно кратко охарактеризованы гетерофазное окисление

и субсолидусный распад твёрдого раствора, сопровождающиеся выделением новых фаз и существенной перестройкой магнитных свойств [15; 16].

**В разделе 1.3** титаномагнетит рассмотрен как объект палеомагнитных и петромагнитных исследований изверженных пород основного состава. Отмечено, что во многих случаях именно этот минерал является главным носителем естественной остаточной намагниченности (NRM).

**В разделе 1.4** изложены теоретические основы термоостаточной намагниченности. Рассмотрена классическая теория Нееля для ансамблей однодоменных невзаимодействующих частиц [17; 18]. В простейшем случае ансамбля идентичных частиц (зёрен) с изотропным распределением осей лёгкого намагничивания термоостаточная намагниченность (TRM) может быть записана в виде

$$\text{TRM} = n \int_0^\pi m \cos \varphi \cdot \tanh \left( \frac{\mu_0 m H \cos \varphi}{k_B T} \right) \frac{\sin \varphi}{2} d\varphi. \quad (2)$$

В слабых полях, по порядку величины соответствующих полю Земли, при  $\mu_0 m H \ll k_B T$  из этого выражения следует линейная зависимость TRM от поля:

$$\text{TRM} \approx \frac{1}{3} \frac{\mu_0 m H}{k_B T} M_s, \quad (3)$$

где  $m$  — магнитный момент отдельной частицы,  $n$  — концентрация частиц. Далее рассмотрены законы Телье — взаимности, независимости и аддитивности частичных термоостаточных намагниченностей, — лежащие в основе экспериментальных методов определения палеонапряжённости по породам вулканического происхождения [3; 19]. Отмечено, что для природных объектов выполнение этих законов часто осложняется широким распределением зёрен по размерам и морфологии, межчастичными взаимодействиями, многодоменностью и минералогическими изменениями при нагрехах [20; 21].

**В разделе 1.5** охарактеризованы базальты рифтовой зоны Красного моря. Отмечено, что данные базальты формировались в условиях медленного спрединга молодой океанической коры [22]. Показано, что их магнитные свойства определяются составом титаномагнетита, степенью его окисления и последующими тектонотермальными воздействиями [23—25].

**По итогам первой главы** отмечено, что корректная интерпретация палеомагнитной записи в базальтах затруднена без учёта состава титаномагнетита, особенностей его катионного распределения, доменного состояния, внутренних напряжений и степени окисления.

**Глава 2. Образцы, использованное оборудование и методы исследований.**

**В разделе 2.1** кратко охарактеризовано оборудование, использованное в диссертационной работе, для проведения петромагнитных, палеомагнитных, термомагнитных и магнитоминералогических исследований.

**В разделе 2.2** изложены методы исследований и методика подготовки образцов. Из исходного фрагмента базальта изготовлена коллекция

из примерно 300 кубических дублей с ребром 1 см для решения задач диссертационной работы. однородность магнитных свойств образцов контролировалась по температуре Кюри, NRM и магнитной восприимчивости. Состояние образцов оценивалось по данным магнитной восприимчивости, термомагнитного анализа, гистерезисных измерений, кривых обратного поля, терморазмагничивания и АF-размагничивания. Расчётное поле  $B_{calc}$  определялось методом Телье–Кое по наклону линейного участка диаграммы Арай–Нагаты; надёжность оценок контролировалась параметром качества  $q$ , параметром DRAT и другими статистическими параметрами.

**В разделе 2.3** дана общая характеристика базальта П72-4 в исходном состоянии. Показано, что образец, отобранный со дна рифтовой зоны Красного моря, представляет собой молодой базальт срединно-океанического типа из фрагмента подушкообразной лавы и содержит титаномагнетит как основной ферритмагнитный минерал без признаков существенных вторичных преобразований. Установлено, что титаномагнетит характеризуется средним содержанием ульвёшпиниелевого компонента 49.9–55.1 мол. % и постоянной решётки  $a = 8.4545 \text{ \AA}$  [A3]. Естественная остаточная намагниченность образцов-дублей изменяется в пределах 33.1–63.3 А/м, а фактор Кёнигсбергера достигает  $Q_n = 70$ , что указывает на доминирование стабильной остаточной намагниченности над индуцированной [A2–A3].

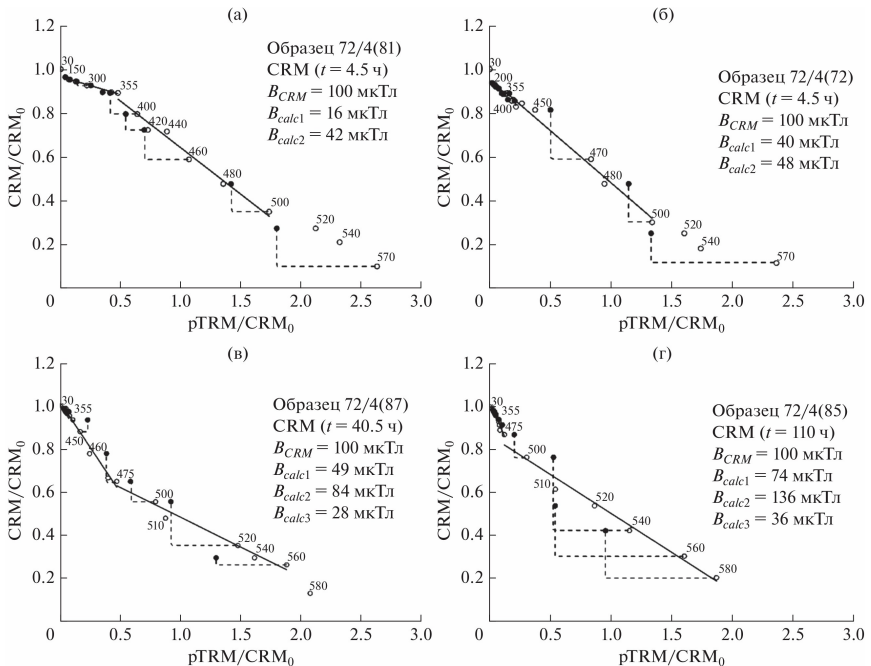
Показано, что титаномагнетит в базальте П72-4 представлен преимущественно зёрнами скелетной и неправильной формы размером от 1 до 20 мкм, характерными для быстро охлаждённых океанических базальтов [A1–A3]. Важным обстоятельством является отсутствие выраженных признаков природного распада твёрдого раствора, развитой трещиноватости, что указывает на хорошую сохранность зёрен титаномагнетита.

Кривые  $\kappa(T)$ , измеренные в атмосфере аргона, характеризуются практически совпадающими ветвями нагрева и охлаждения вплоть до  $\sim 600^\circ\text{C}$ , что указывает на отсутствие заметных необратимых превращений и подтверждает химическую стабильность исходного состояния [A4]. Температура Кюри, определённая по зависимостям  $\kappa(T)$  и  $M(T)$ , составляет  $\sim 200\text{--}260^\circ\text{C}$ . Наблюдаемое при первом нагреве возрастание начальной восприимчивости примерно в 1.5 раза интерпретируется как отжиг внутренних напряжений в ферритмагнитных зёрнах. Гистерезисные параметры ( $B_c = 17.3 \text{ мТл}$ ,  $B_{cr} = 22.1 \text{ мТл}$ ,  $M_{rs}/M_s \approx 0.37$ ,  $B_{cr}/B_c \approx 1.28$ ,  $M_s \approx 2400 \text{ А/м}$ ) соответствуют PSD-области диаграммы Дея–Данлопа. Термо- и АF-размагничивание (рис. 1) выявляют однокомпонентный состав NRM: около 55–60 % намагниченности снимается вблизи средней температуры Кюри, полное терморазмагничивание достигается при  $\sim 400^\circ\text{C}$ , а по данным АFD медианное поле и поле 90 %-ного размагничивания составляют соответственно  $h_{0.5} = 15.5 \text{ мТл}$  и  $h_{0.9} = 31.9 \text{ мТл}$  [A2]; отсутствие заметного размагничивания в полях до  $\sim 10 \text{ мТл}$  указывает на малую долю MD-зёрен.

**По итогам второй главы** обосновано использование базальта П72-4 в качестве объекта исследования диссертационной работы: содержащийся



размагничивались нагревом в атмосфере аргона выше температуры Кюри исходного титаномагнетита с последующим АФ-размагничиванием, что обеспечивало практически полное удаление исходной NRM. Затем CRM формировалась при изотермическом отжиге образцов-дублей на воздухе при  $T_{ан} = 355^\circ\text{C}$  в слабом магнитном поле  $B_{ан} = 100$  мкТл в течение различных времён выдержки. Такой режим позволял проследить эволюцию магнитного состояния от начальных стадий однофазного окисления до высокоокисленного титаномаггемита и начала его гетерофазного окисления. В дальнейшем анализировались два типа состояний: CRM<sub>t</sub>, сформированная в ходе отжига, и CRM<sub>t</sub> + pTRM, возникавшее при дополнительном охлаждении от  $T_{ан}$  в лабораторном поле 100 мкТл.



**Рисунок 2.** Диаграммы Араи–Нагаты для химической остаточной намагниченности (CRM), полученной на образцах базальта П72/4 в результате изотермического отжига при  $T_{ан} = 355^\circ\text{C}$  в магнитном поле  $B_{ан} = 100$  мкТл в течение различного времени: (а) – 4.5 ч; (б) – 16.5 ч; (в) – 40.5 ч; (г) – 110 ч. Пустые символы соответствуют данным, полученным в циклах Телье, сплошные символы – "чек-точки". Опубликовано в [АЗ].

**В разделе 3.2** показано, что увеличение времени отжига при  $T_{ан} = 355^\circ\text{C}$  сопровождается однофазным окислением титаномагнетита и закономерным изменением его магнитных свойств. По данным термомагнитного анализа уже после 4.5 ч. возникает фазово-неоднородное состояние с двумя температурами Кюри (265–270°C и 415–423°C), соответствующее сосуществованию исходного титаномагнетита и титаномаггемита с  $Z = 0.17$ –0.68.

Таблица 1. Результаты определения магнитного поля методом Телье-Кое по смоделированным намагниченностям в образцах базальта Красного моря П72-4. Данные из работы [А3]

$t$ , ч	№ дубля	Состояние*)	$\Delta T$ , °C	$N$	$q$	$g$	$f$	$ b $	$\sigma(b)$	DRAT, %		$B_{\text{calc}}$ , мкТл
										mean	max	
4.5	81	CRM	150–355	7	1.2	0.99	0.072	0.16	0.010	1.3	2.7	16
			355–501	8	10.0	0.97	0.543	0.42	0.023	2.6	4.3	42
	80	CRM+pTRM	30–355	7	2.7	0.91	0.284	0.90	0.090	2.5	3.9	90
			355–501	10	8.9	0.97	0.425	0.44	0.021	3.7	10.8	44
16.5	72	CRM	150–355	7	0.9	0.96	0.051	0.40	0.023	4.6	11	40
			355–501	11	14.4	0.95	0.587	0.48	0.019	2.5	6.6	48
	71	CRM+pTRM	30–355	7	1.1	0.90	0.121	1.03	0.109	3.2	7.6	103
			355–501	12	23.8	0.95	0.538	0.52	0.011	2.0	6.5	52
40.5	87	CRM	30–355	7	0.1	0.93	0.022	0.49	0.372	6.6	12.9	49
			355–475	8	5.2	0.91	0.317	0.84	0.047	10.1	18.1	84
	475–560	7	5.5	0.98	0.388	0.28	0.021	3.1	6.5	28		
	88	CRM+pTRM	30–355	7	0.9	0.88	0.080	1.39	0.113	2.6	4.6	139
355–475			8	13.7	0.92	0.351	0.66	0.016	5.8	14.4	66	
			475–560	7	7.5	0.98	0.394	0.30	0.016	3.4	7.2	30
			85	CRM	30–355	7	0.3	0.92	0.035	0.74	0.095	6.1
355–475	8	0.7			0.91	0.094	1.36	0.166	2.1	4.4	136	
110			485–580	7	7.7	0.97	0.565	0.36	0.027	3.2	3.8	36
			86	CRM+pTRM	30–355	7	0.4	0.86	0.060	1.44	0.213	4.9
355–475	8	0.9			0.90	0.082	1.40	0.110	12.3	42.9	140	
			485–580	7	9.2	0.98	0.585	0.36	0.023	2.9	3.9	36

*Примечание:* CRM — химическая остаточная намагниченность; CRM+pTRM — сумма химической остаточной и парциальной термоостаточной намагниченности. Полный набор параметров  $N$ ,  $f$ ,  $g$ ,  $b$ ,  $\sigma(b)$ ,  $\text{DRAT}_{\text{mean}}$ ,  $\text{DRAT}_{\text{max}}$  и способ расчёта  $B_{\text{calc}}$  приведены в главе 2 диссертации.

После 16.5 ч. высокотемпературная составляющая становится преобладающей (442°C,  $Z = 0.22\text{--}0.79$ ). Лишь после 40.5 и 110 ч. формируется почти однородное состояние высокоокисленного титаномаггемита с температурами Кюри 452–463°C при  $Z \approx 0.81$  и 0.93; при 350 ч. появляются признаки начала гетерофазного окисления метастабильной шпинельной фазы.

Величина CRM возрастает от 17.9 А/м после 4.5 ч. до 24.7 и 28.4 А/м после 16.5 и 40.5 ч., а при 110 ч. несколько снижается до 26.0 А/м. На этом основании по данным термомагнитного анализа и параметрам петли магнитного гистерезиса выделены три частично перекрывающиеся стадии окисления: (1) ранняя стадия однофазного окисления при сохранении фазовой неоднородности (0–16.5 ч.,  $Z \approx 0.17\text{--}0.79$ ); (2) стадия формирования относительно гомогенного высокоокисленного титаномаггемита (40.5–110 ч.,

$Z \approx 0.81-0.93$ ); (3) стадия структурной неустойчивости с начальными признаками окислительного распада метастабильной шпинельной фазы, начиная примерно со 100–110 часов.

**В разделе 3.3** по диаграммам Арай–Нагаты (рис. 2) и данным табл. 1 оценена применимость процедуры Телье–Кое для определения поля формирования CRM и pTRM. Показано, что для состояния CRM<sub>t</sub> диаграммы Арай–Нагаты имеют неидеальную ступенчато-сегментную структуру: на ранних стадиях окисления (4.5 и 16.5 ч) выделяются два квазилинейных участка, разделённые вблизи  $T_{an}$ , тогда как при 40.5 и 110 ч диаграммы становятся трёхсегментными и приобретают заметную вогнутость. По информативному высокотемпературному сегменту выше  $T_{an}$  расчётные значения  $B_{calc}$  составляют 42, 48 и 84 мкТл после 4.5, 16.5 и 40.5 ч отжига соответственно, то есть оказываются систематически заниженными по сравнению с полем формирования 100 мкТл. Для наиболее окисленных состояний минералогические изменения титаномагнетита в ходе процедуры Телье–Кое не позволяют использовать высокотемпературный сегмент диаграммы для корректной оценки "палеонапряжённости". Для состояния CRM<sub>t</sub> + pTRM в интервале 30–355°C получены значения  $B_{calc} = 90-144$  мкТл, тогда как в более высокотемпературной области они составляют 44–66 мкТл. Тем самым показано, что результат определения поля зависит как от стадии однофазного окисления, так и от соотношения вкладов CRM и pTRM в выбранном температурном интервале. Отмечено также, что приемлемые значения параметра качества  $q$  и умеренные значения DRAT сами по себе ещё не гарантируют физической корректности результата; надёжный контроль должен включать сопоставление поведения на диаграммах Арай–Нагаты с данными термочистки в нулевом поле и учёт возможных минералогических изменений в ходе нагревов.

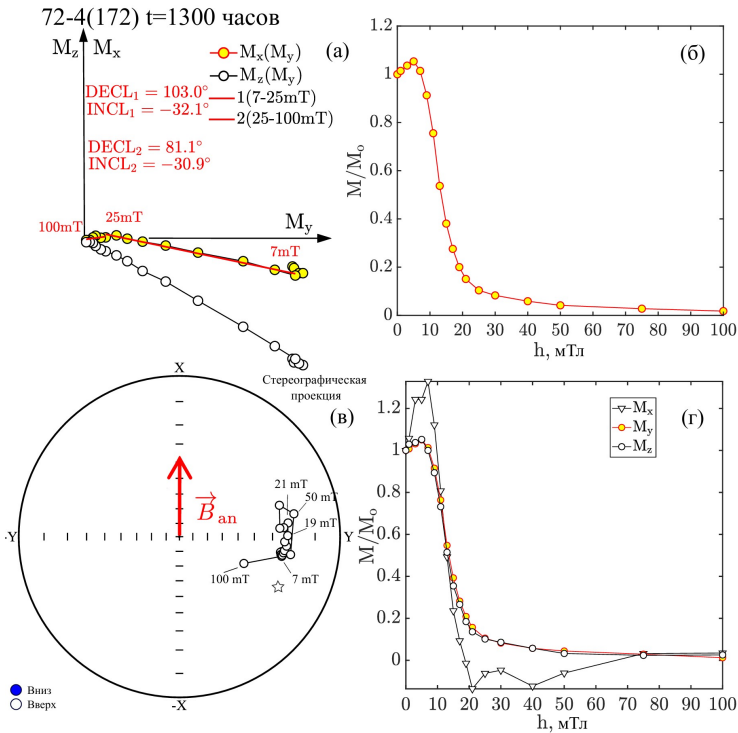
**По итогам третьей главы** показано, что при изотермическом отжиге базальта П72-4 при  $T_{an} = 355^\circ\text{C}$  титаномагнетит последовательно проходит три частично перекрывающиеся стадии однофазного окисления: стадию фазово-неоднородного состояния, стадию формирования относительно гомогенного высокоокисленного титаномагнетита и стадию структурной неустойчивости с начальными признаками окислительного распада. Установлено, что степень окисления надёжно диагностируется по совокупности термомагнитных и гистерезисных параметров. Показано также, что для состояния CRM<sub>t</sub> процедура Телье–Кое приводит к систематически заниженным значениям  $B_{calc}$  по сравнению с полем формирования 100 мкТл, тогда как для состояний CRM<sub>t</sub> + pTRM результат существенно зависит от выбранного температурного интервала и соотношения вкладов CRM и pTRM.

**Глава 4. Влияние низкотемпературного однофазного окисления титаномагнетита на сохранность NRM в базальте П72/4.**

**В четвертой главе** исследовано влияние лабораторно смоделированного низкотемпературного однофазного окисления титаномагнетита на

палеоинформативность естественной остаточной намагниченности термооста- точного происхождения в базальте П72-4.

**В разделе 4.1** изложена схема эксперимента, моделирующего форми- рование вторичной CRM при низкотемпературном однофазном окислении титаномагнетита базальта П72-4. Для этого после частичного снятия исход- ной NRM нагревом в аргоне до  $260^\circ\text{C}$  образцы отжигали на воздухе при той же температуре в поле  $B_{\text{ан}} = 50$  мкТл, направленном под углом око- ло  $110^\circ$  к вектору исходной намагниченности, с выдержками 12.5, 100, 400 и 1300 часов. Такая схема позволила проследить изменение соотношения между сохранившейся высокотемпературной частью NRM термоостаточной природы и вторичной CRM, возникающей по мере окисления в магнитном поле.



**Рисунок 3.** АF-размагничивание NRM\* образца П72-4 после 1300 ч отжига при  $T_{\text{ан}} = 260^\circ\text{C}$  в магнитном поле  $B_{\text{ан}} = 50$  мкТл: (а) диаграмма Зийдсверельда, (б) зависимость NRM\* от поля, (в) стереограмма, (г) компоненты  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . Звёздочкой отмечено исходное палеонаправление, определённое по 8 образцам ( $\text{Dec} = 113.6^\circ$ ,  $\text{Inc} = -26.7^\circ$ ,  $k \approx 716$ ,  $\alpha_{95} \approx 2.1^\circ$ ). Опубликовано в [A2]

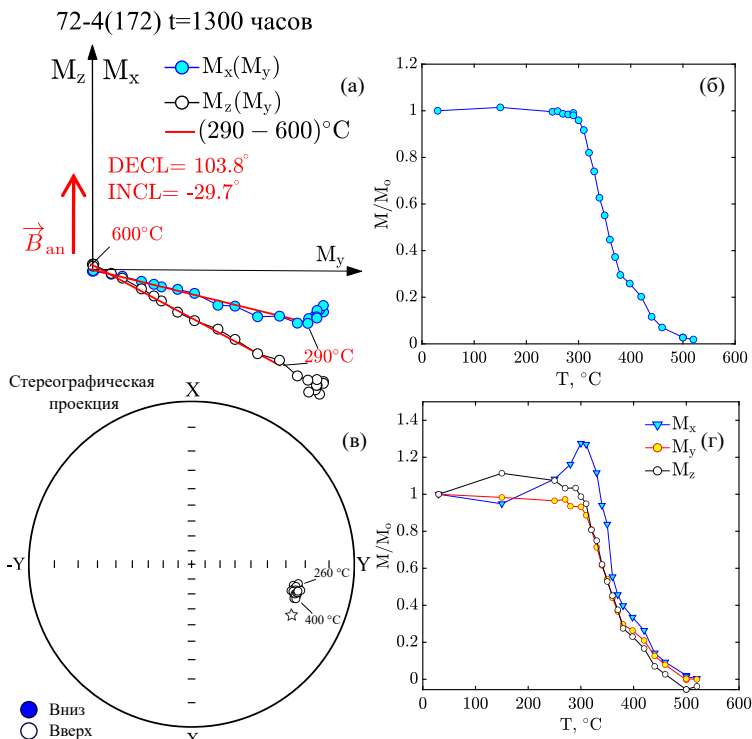
**В разделе 4.2** рассмотрены фазовые и магнитные изменения титаномагнетита при отжиге образцов на воздухе при  $260^\circ\text{C}$ . Показано, что

однофазное окисление сопровождается повышением температуры Кюри, изменением магнитных параметров и формированием вторичной CRM.

**В разделе 4.3** по результатам ступенчатого терморазмагничивания и размагничивания переменным магнитным полем проанализировано влияние однофазного окисления на компонентный состав NRM\* и поведение её декартовых компонент (рис. 4, 3). Показано, что с ростом степени окисления возрастает вклад компоненты  $M_x$ , коллинеарной полю  $B_{ан}$ , тогда как компоненты  $M_y$  и  $M_z$ , связанные преимущественно с исходной TRM, изменяются слабее. В качестве референтного палеонаправления принято среднее направление, определённое по 8 образцам исходного базальта П72-4; на стереограммах оно показано звёздочкой:  $Dec = 113.6^\circ$ ,  $Inc = -26.7^\circ$ . Уже после 100 ч отжига ( $Z \approx 0.31$ ) вектор NRM\* заметно смещается в сторону поля отжига: по данным AF-размагничивания получено направление  $D_{AFD} = 106.7^\circ$ ,  $I_{AFD} = -32.0^\circ$ , тогда как по высокотемпературной части намагниченности при терморазмагничивании определяется направление  $D_{TD} = 114.4^\circ$ ,  $I_{TD} = -28.9^\circ$ , остающееся близким к референтному. Это указывает на присутствие вторичной CRM, ориентированной вдоль  $B_{ан}$ . При дальнейшем увеличении степени окисления до  $Z = 0.42-0.69$  аномалии в поведении  $M_x$  при AF-размагничивании выражены наиболее отчётливо, а направление стабильной высокотемпературной компоненты уже отклоняется от референтного; ни AF-, ни терморазмагничивание не позволяют надёжно воспроизвести исходное палеонаправление (рис. 4, 3).

**В разделе 4.4** показано, что при низкотемпературном однофазном окислении титаномагнетита в магнитном поле диаграммы Араи–Нагаты приобретают двухсегментный вид. По результатам экспериментов Телье–Кое установлено, что такое окисление приводит к занижению  $B_{calc}$ , определяемого по низкотемпературному сегменту диаграммы Араи–Нагаты. Если для исходного состояния в интервале 270–360°C получено  $B_{calc} = 59.8$  мкТл, то после отжига в течение 12.5, 400 и 1300 ч. соответствующие значения составляют 49.5, 50.1 и 47.5 мкТл, то есть уменьшаются примерно на 16–21 % относительно референтного уровня. При этом качество определений в первом сегменте остаётся приемлемым: параметр  $q$  составляет 9.5–18.6, а значения  $DRAT_{mean}$  и  $DRAT_{max}$  не выходят за умеренные пределы. Напротив, второй линейный сегмент диаграмм Араи–Нагаты (360–480°C) даёт значения  $B_{calc} = 22.6-28.8$  мкТл при низком качестве аппроксимации ( $q = 3.2-4.9$ ,  $DRAT_{max} = 17.6-24.9\%$ ) и потому не может рассматриваться как надёжный для определения палеонапряжённости.

**По итогам четвёртой главы** показано, что низкотемпературное однофазное окисление титаномагнетита сопровождается наложением вторичной CRM на первичную составляющую NRM\*, что затрудняет корректное определение палеонаправления и палеонапряжённости. Установлено, что химическая намагниченность однофазно-окисленного титаномагнетита диагностируется по совокупности признаков, включающих снижение температуры Кюри при нагреве в инертной среде, наличие максимума на кривой



**Рисунок 4.** Ступенчатое терморазмагничивание  $\text{NRM}^*$  образца П72-4 после 1300 ч отжига при  $T_{\text{ан}} = 260^\circ\text{C}$  в магнитном поле  $B_{\text{ан}} = 50$  мкТл: (а) диаграмма Зийдервельда, (б) зависимость  $\text{NRM}^*$  от температуры, (в) стереограмма, (г) компоненты  $M_x, M_y, M_z$ . Звёздочкой отмечено исходное палеонаправление, определённое по 8 образцам ( $\text{Dec} = 113.6^\circ, \text{Inc} = -26.7^\circ, k \approx 716, \alpha_{95} \approx 2.1^\circ$ ). Опубликовано в [A2]

размагничивания и аномальное поведение компоненты намагниченности, коллинеарной полю отжига, указывающее на её частичное самообращение.

## Глава 5. Моделирование окисления титаномагнетита, вызванного внедрением магмы.

**Пятая глава** посвящена лабораторному моделированию постмагматического низкотемпературного однофазного окисления титаномагнетита и оценке его влияния на сохранность первичной TRM и результаты определения палеонапряжённости методом Телье–Кое. Предложена схема химического перемагничивания, при которой вторичная CRM, формирующаяся при окислительном отжиге, накладывается на остаток ранее созданной первичной TRM.

**В разделе 5.1** изложена методика эксперимента по лабораторному моделированию частичного химического перемагничивания, вызванного однофазным окислением при вторичном тепловом воздействии, которое в естественных условиях может происходить при внедрении интрузивного тела

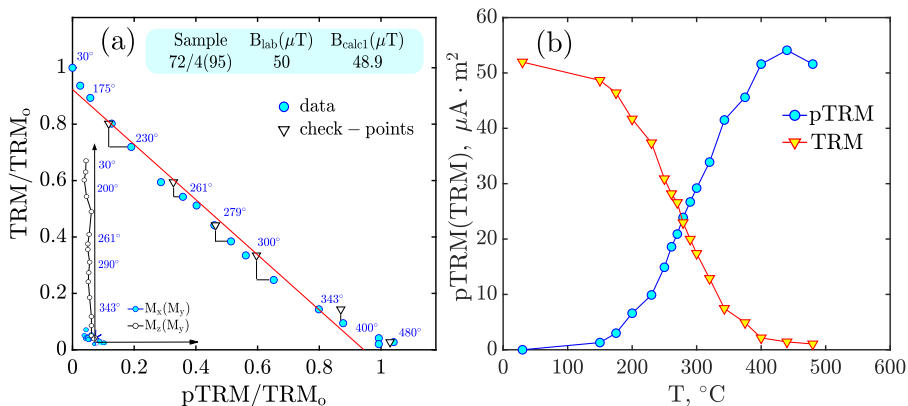
в уже сформировавшуюся вулканическую породу. На серии предварительно размагниченных образцов-дублей сначала создавалась лабораторная TRM, рассматриваемая как аналог первичной палеомагнитной записи: для этого образцы нагревали до  $400^{\circ}\text{C}$  в атмосфере аргона и охлаждали в магнитном поле  $50\text{ мкТл}$ . Затем образцы повторно нагревали до  $260^{\circ}\text{C}$  и охлаждали в нулевом поле, так что низкотемпературная часть TRM удалялась, а в образце сохранялась только её высокотемпературная часть с температурами деблокирования  $260\text{--}400^{\circ}\text{C}$ . Такое состояние моделировало частично сохранившуюся первичную намагниченность породы после её вторичного прогрева. На следующем этапе образцы выдерживали на воздухе при  $260^{\circ}\text{C}$  в магнитном поле  $50\text{ мкТл}$  в течение 12.5, 100, 400 и 1300 ч, вызывая однофазное окисление титаномагнетита и формирование вторичной CRM. Поле отжига ориентировали либо параллельно, либо перпендикулярно исходной TRM, что позволяло смоделировать два предельных сценария химического перемагничивания.

**В разделе 5.2** рассмотрена эволюция петромагнитных свойств титаномагнетита с увеличением длительности отжига и, соответственно, степени однофазного окисления. Показано, что при росте  $Z$  от 0 до 0.56 температура Кюри по кривым нагрева повышается от  $260$  до  $435^{\circ}\text{C}$ , намагниченность насыщения возрастает, а коэрцитивная сила снижается. При нагреве в инертной атмосфере окисленный титаномагнетит гомогенизуется, и температура Кюри по кривой охлаждения возвращается к значениям, близким к исходным ( $260\text{--}285^{\circ}\text{C}$ ), что служит диагностическим признаком однофазного окисления. По результатам теста Лаури, признаков появления дополнительных магнитных фаз в спектре терморазмагничивания трёхкомпонентной IRM не выявлено.

**В разделе 5.3** охарактеризованы магнитные состояния, формирующиеся при отжиге в полях различной ориентации относительно исходной TRM. Показано, что при  $B_{\text{ан}} \perp \text{TRM}$  в образцах выделяются две компоненты остаточной намагниченности с существенно перекрывающимися коэрцитивными спектрами и спектрами деблокирующих температур; при этом компонента  $M_x$ , связанная с CRM, обладает более широким коэрцитивным спектром и повышенной устойчивостью в полях выше  $17\text{--}20\text{ мТл}$ . При  $B_{\text{ан}} \parallel \text{TRM}$  результаты AFD- и TD-размагничивания выявляют только одну результирующую компоненту: CRM и TRM в этом случае по стандартным процедурам не разделяются.

**В разделе 5.4** представлены результаты определения палеонапряжённости методом Телье–Кое для исходного и однофазно-окисленных состояний базальта П72-4. Для неокисленного образца получено  $B_{\text{calc}} = 48.9\text{ мкТл}$ , что близко к полю создания исходной TRM ( $50\text{ мкТл}$ ); диаграмма Араи–Нагаты в целом сохраняет линейный характер, за исключением небольших отклонений в низко- и высокотемпературной областях (рис. 5).

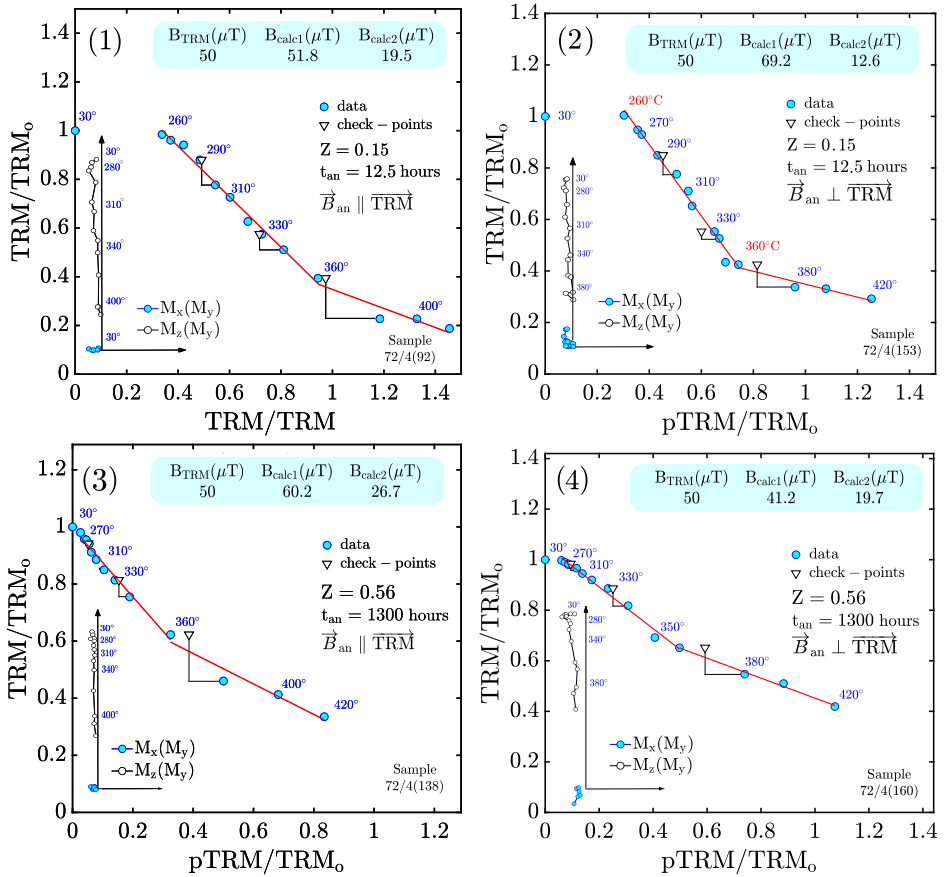
Для окисленных образцов диаграммы Араи–Нагаты приобретают двухсегментный вид с изломом в области  $360^{\circ}\text{C}$ , то есть выше температуры



**Рисунок 5.** Диаграмма Арай–Нагаты для исходной лабораторной TRM образца P72/4(95) (а) и зависимости  $NRM(T)$  и  $pTRM(T)$  (б), полученные в процедуре Телье–Кое. В левом нижнем углу показаны диаграммы Зийдervельда для шагов нагрева в нулевом поле. Поле создания исходной TRM:  $B_{TRM} = 50$  мкТл. Опубликовано в [A1]

окислительного отжига  $T_{an} = 260^\circ\text{C}$  (рис. 6). Низкотемпературный сегмент  $260\text{--}360^\circ\text{C}$  связан преимущественно с сохранившейся высокотемпературной частью исходной TRM и даёт наиболее устойчивые оценки  $B_{calc}$ . При  $B_{an} \parallel TRM$  и умеренной степени окисления ( $Z \leq 0.48$ ) получены значения  $B_{calc} = 48.5\text{--}52.5$  мкТл, близкие к полю создания исходной TRM,  $B_{TRM} = 50$  мкТл. При  $Z = 0.56$  возникает завышение до 60.2 мкТл. При  $B_{an} \perp TRM$  искажения проявляются уже на ранней стадии: при  $Z = 0.15$  получено завышение до 69.2 мкТл, а при  $Z = 0.48\text{--}0.56$  — занижение до 41.2 мкТл. Высокотемпературный сегмент  $360\text{--}420^\circ\text{C}$  оказывается менее надёжным, поскольку в нём возрастает вклад химически преобразованной составляющей и минералогических изменений при нагревах. Таким образом, результат восстановления поля создания исходной TRM методом Телье–Кое определяется не только степенью однофазного окисления, но и ориентацией поля окислительного отжига относительно исходной TRM, что видно по сопоставлению параллельной и перпендикулярной серий на рис. 6.

**По итогам пятой главы** установлено, что при лабораторном моделировании вторичного теплового воздействия однофазное окисление титаномагнетита приводит к наложению вторичной CRM на частично сохранившуюся первичную TRM. Показано, что результат определения палеонапряжённости методом Телье–Кое зависит от степени окисления и ориентации поля окислительного отжига относительно первичной TRM. При  $B_{an} \parallel TRM$  метод даёт надёжные оценки при умеренном окислении, тогда как при  $B_{an} \perp TRM$  значения  $B_{calc}$  искажаются уже на ранних стадиях окисления.



**Рисунок 6.** Диаграммы Арай–Нагаты, полученные в экспериментах Телье–Кое для магнитных состояний, сформированных при частичном химическом перемагничивании базальта Р72/4 в магнитном поле. Рисунок иллюстрирует влияние ориентации этого поля относительно исходной TRM на результат определения палеонапряжённости ( $B_{calc}$ ) .

*Подрисунки:* (1)  $B_{an} \parallel TRM$ ,  $t_{an} = 12.5$  ч; (2)  $B_{an} \perp TRM$ ,  $t_{an} = 12.5$  ч; (3)  $B_{an} \parallel TRM$ ,  $t_{an} = 1300$  ч; (4)  $B_{an} \perp TRM$ ,  $t_{an} = 1300$  ч. Красная линия задаёт наклон, использованный для расчёта  $B_{calc}$ . Опубликовано в [A1].

## Заключение

В диссертационной работе в лабораторных условиях воспроизведены начальные сценарии постмагматического окисления природного титаномагнетита на воздухе и исследовано их влияние на остаточную намагниченность базальтов. Установлены закономерности формирования химической остаточной намагниченности при низкотемпературном однофазном окислении, определены признаки её присутствия в составе естественной остаточной

намагниченности, разработана методика моделирования частичного химического перемagnetивания и оценены пределы корректного применения метода Телье–Кое.

Следующие основные результаты диссертационного исследования обосновывают **положения, выносимые на защиту**:

1. В главе 3 показано, что при изотермическом отжиге базальта П72-4 при  $T_{\text{ан}} = 355^{\circ}\text{C}$ , превышающем точку Кюри исходной фазы, формируется химическая остаточная намагниченность. Установлено, что в процедуре Телье–Кое эта намагниченность имеет сходный с термоостаточной намагниченностью спектр температур деблокирования и даёт заниженные значения расчётного поля по сравнению с полем её формирования (100 мкТл). Для состояний после 4,5, 16,5 и 40,5 часов отжига значения  $V_{\text{calc}}$  составляют соответственно 42, 48 и 84 мкТл, что соответствует занижению на 55%, 48–52% и 16–34%. Для наиболее окисленного состояния высокотемпературная часть диаграмм Арай–Нагаты дополнительно искажается вследствие минералогических изменений титаномагнетита в ходе самой процедуры Телье–Кое, так что получаемые оценки перестают быть надёжными. Тем самым показано, что химическая остаточная намагниченность, формирующаяся при однофазном окислении титаномагнетита выше точки Кюри исходной фазы, в процедуре Телье–Кое практически неотличима от термоостаточной намагниченности и характеризуется заниженными значениями  $V_{\text{calc}}$ .

Эти результаты обосновывают **первое защищаемое положение**:

*«Химическая остаточная намагниченность, образованная при однофазном окислении титаномагнетита выше точки Кюри исходной фазы, имеет сходный с термоостаточной намагниченностью спектр температур деблокирования, а метод Телье-Кое дает заниженное поле ее формирования».*

2. В главах 3 и 4 показано, что наличие вторичной химической остаточной намагниченности в естественной остаточной намагниченности однофазно-окисленного титаномагнетита диагностируется по совокупности признаков, включающей эффект термической гомогенизации и особенности поведения остаточной намагниченности при размагничивании. После окислительного отжига при  $260^{\circ}\text{C}$  в магнитном поле 50 мкТл в течение 12,5, 100, 400 и 1300 часов нагрев образцов в инертной среде аргона до  $600^{\circ}\text{C}$  приводит к снижению температуры Кюри до значений, близких к исходному состоянию; разность  $\Delta T_c$  между температурой Кюри до и после такой гомогенизации используется как параметр, отражающий степень однофазного окисления  $Z$ . Для исследованных состояний степень окисления возрастает от  $Z \sim 0,3$  после 100 часов отжига до  $Z = 0,42\text{--}0,69$  после 400–1300 часов. Показано также, что при размагничивании изменяется относительная устойчивость компонент остаточной намагниченности; наиболее отчётливо это проявляется в поведении компоненты, коллинеарной полю окислительного отжига, для которой наблюдаются аномальный рост на начальных ступенях размагничивания и последующее ускоренное разрушение, что указывает на

возможное частичное самообращение намагниченности. Сопоставление результатов AF- и термического размагничивания показывает, что вторичная химическая составляющая входит в состав NRM, осложняет выделение первичного палеонаправления и при прогрессирующем однофазном окислении приводит к его искажению.

Эти результаты обосновывают **второе защищаемое положение:**

*«Химическая намагниченность однофазно-окисленного титаномагнетита в базальтах устанавливается по наличию максимума на кривой размагничивания и снижению температуры Кюри при нагреве в инертной среде».*

3. В главе 5 разработана и апробирована методика лабораторного моделирования низкотемпературного однофазного окисления титаномагнетита в результате вторичного теплового воздействия, позволяющая воспроизводить состояния с наложением вторичной химической остаточной намагниченности на ранее сформированную термоостаточную намагниченность. Экспериментальная схема включает формирование исходной лабораторной TRM как аналога первичной палеомагнитной записи, её частичное снятие нагревом до  $260^{\circ}\text{C}$  в нулевом поле с сохранением высокотемпературной pTRM, а затем изотермический отжиг при той же температуре в магнитном поле  $B_{\text{ан}} = 50$  мкТл в течение 12.5, 100, 400 и 1300 ч. В результате в образце воспроизводится смешанное состояние остаточной намагниченности, представляющее собой суперпозицию сохранившейся pTRM и новообразованной CRM. Использование двух предельных ориентаций поля окисления — параллельной и перпендикулярной исходной TRM — позволяет моделировать различные сценарии вторичного химического перемагничивания при тепловом воздействии на уже термонамагниченную породу.

Эти результаты обосновывают **третье защищаемое положение:**

*«Методика лабораторного моделирования однофазного окисления титаномагнетита, воспроизводящая формирование химической намагниченности на фоне частично сохраняющейся первичной термоостаточной намагниченности».*

В той же главе показано, что корректность определения поля методом Телье–Кое зависит одновременно от степени однофазного окисления и ориентации поля отжига. При  $B_{\text{ан}} \parallel \text{TRM}$  в интервале  $260\text{--}360^{\circ}\text{C}$  наиболее надёжные результаты получены на умеренных стадиях окисления: при  $Z \approx 0.48$  значение  $B_{\text{calc}} = 48.5$  мкТл практически совпадает с полем создания исходной TRM (50 мкТл). При дальнейшем росте степени окисления до  $Z = 0.56$  точность заметно ухудшается и возникает завышение до 60.2 мкТл. При  $B_{\text{ан}} \perp \text{TRM}$  искажения проявляются уже на ранней стадии: при  $Z = 0.15$  получено завышение до 69.2 мкТл, тогда как при  $Z = 0.48$  и  $0.56$  расчётное поле снижается до 41.2 мкТл. Следовательно, корректное определение величины поля сохраняется лишь при умеренной степени однофазного окисления, практически до  $Z \leq 0.5$ , и при направлении поля окисления, близком к направлению первичной TRM. При поле, перпендикулярном TRM, метод

даёт искажённые значения расчётного поля, причём знак смещения зависит от стадии окисления.

Эти результаты обосновывают **четвёртое защищаемое положение:**

*«Палеонапряженность, определенная по остаточной намагниченности однофазно-окисленного титаномагнетита, зависит от направления магнитного поля, действовавшего в процессе окисления: при параллельной ориентации метод Телье–Кое дает надежное определение поля при степени окисления меньше 0.5, при перпендикулярной ориентации — определения поля ненадежны».*

Проведённое исследование, конечно, не исчерпывает всех аспектов поставленной проблемы и позволяет обозначить теоретические и практические направления её дальнейшей разработки.

С теоретической точки зрения дальнейшая разработка темы связана с необходимостью построения физически обоснованной теории химического намагничивания неоднородных зёрен, прежде всего частиц с вихревой магнитной структурой, для которых релаксационные процессы и механизмы формирования CRM в настоящее время остаются изученными недостаточно полно. С практической же точки зрения перспективным представляется расширение экспериментальной базы за счёт постановки аналогичных опытов на более широком классе природных образцов, что позволит выявить особенности химического перемагничивания ансамблей титаномагнетита иного состава и морфологии.

## **Благодарности**

Автор выражает искреннюю признательность всем сотрудникам кафедры физики Земли физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова за доброжелательную атмосферу и поддержку. Отдельно автор благодарит В. Т. Минлигареева, Е. В. Воронину, М. Г. Потанину, А. Ю. Марченкова, А. В. Исаеву, В. М. Сердюк, Т. А. Версан и В. О. Михайлова за тёплое профессиональное общение и радость совместной работы.

Отдельная признательность выражается А. Н. Целебровскому за многолетнее коллегиальное взаимодействие, содержательные обсуждения результатов экспериментов, совместную работу и постоянную готовность выручить в трудную минуту.

Особую благодарность автор приносит заведующему кафедрой физики Земли, д. ф.-м. н., профессору В. Б. Смирнову за поддержку диссертационной работы, внимание к её выполнению и создание на кафедре благоприятных условий.

Автор сердечно благодарит д. ф.-м. н., профессора В. Э. Павлова, д. ф.-м. н. Н. А. Усова и д. ф.-м. н., профессора Н. С. Перова за внимательное чтение рукописи диссертации и ценные замечания, позволившие уточнить ряд формулировок, исправить ошибки и улучшить изложение результатов. Искренняя признательность выражается Р. А. Рытову за продуктивные научные обсуждения и поддержку. Автор также благодарит сотрудника ИФЗ

РАН Г. П. Маркова за ценные советы и замечания, а А. Н. Некрасова — за проведение электронно-микроскопических исследований.

Самую глубокую благодарность автор выражает своему научному руководителю, заведующему лабораторией геомагнетизма, д. ф.-м. н., профессору В. И. Максимочкину за постановку научных задач, неизменное внимание к работе, многолетнюю поддержку, терпение, обсуждение результатов и принципиальные замечания на всех этапах выполнения диссертации. Автор искренне признателен Валерию Ивановичу за доверие и ту научную школу, без которой выполнение данной работы было бы невозможно.

**Список опубликованных работ по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.**

A1. *Grachev R., Maksimochkin V., Rytov R., Tselebrovskiy A., Nekrasov A.* Modeling Magma Intrusion-Induced Oxidation: Impact on the Paleomagnetic TRM Signal in Titanomagnetite // *Geosciences (Switzerland)*. 2025. Vol. 15, no. 10. P. 372. – EDN: TJKUHP (0.93 п.л., импакт-фактор 2,1 (JIF), вклад автора: разработка методики эксперимента, выполнение магнитных измерений, обработка и анализ результатов, интерпретация результатов и формулировка выводов, подготовка текста рукописи публикации).

A2. *Максимочкин В.И., Грачев Р.А., Целебровский А.Н.* Влияние однофазного окисления титаномagnetита в базальтах на определение величины и направления древнего магнитного поля // *Физика Земли*. 2022. № 2. С. 73–87. – EDN: ZKQMLJ (0.55 п.л., импакт-фактор 1,412 (РИНЦ), вклад автора: постановка и проведение лабораторных экспериментов, выполнение магнитных измерений, обработка и анализ результатов, интерпретация результатов и формулировка выводов, подготовка текста рукописи публикации).

Переводная версия: *Maksimochkin V.I., Grachev R.A., Tselebrovskiy A.N.* Effect of single-phase oxidation of titanomagnetite in basalts on the determination of intensity and direction of paleomagnetic field // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. Vol. 58, no. 2. pp. 216–229. – EDN: DLEMVQ

A3. *Максимочкин В.И., Грачев Р.А., Целебровский А.Н.* Определение поля формирования искусственной CRM и PTRM методом Телье на различных стадиях окисления природного титаномagnetита // *Физика Земли*. 2020. № 3. С. 134–146. – EDN: MLMVMM (0.61 п.л., импакт-фактор 1,412 (РИНЦ), вклад автора: выполнение магнитных измерений, обработка и обобщение результатов, интерпретация результатов и формулировка выводов, подготовка текста рукописи публикации).

Переводная версия: *Maksimochkin V.I., Grachev R.A., Tselebrovskiy A.N.* Determination of the formation field of artificial CRM and PTRM by the Thellier method at different oxidation stages of natural titanomagnetite // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. Vol. 56, no. 3. pp. 413–424. – EDN: THEKKA

А4. *Максимочкин В.И., Грачев Р.А.* Стабильность титаномагнетита базальта Красного моря при нагревах в воздухе и в аргоне // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2019. № 6. С. 114–121. – EDN: XBNXYB (0.35 п.л., импакт-фактор 0,169 (РИНЦ), вклад автора: выполнение магнитных измерений, обработка и обобщение результатов, интерпретация результатов и формулировка выводов, подготовка текста рукописи публикации).

Переводная версия: *Maksimochkin V.I., Grachev R.A.* The stability of titanomagnetite basalt of the Red sea during heating in air and argon // Moscow University Physics Bulletin. 2019. Vol. 74, no. 6. pp. 697–705. – EDN: IWGBZQ

## Список литературы

1. *Bleil U., Petersen N.* Variations in magnetization intensity and low-temperature titanomagnetite oxidation of ocean floor basalts // *Nature*. — 1983. — Vol. 301. — P. 384–388.
2. *Johnson H., Merrill R.* Low-temperature oxidation of a titanomagnetite and the implications for paleomagnetism // *Journal of Geophysical Research*. — 1973. — Vol. 78, no. 23. — P. 4938–4949.
3. *Dunlop D. J., Özdemir Ö.* Rock magnetism: fundamentals and frontiers. — Cambridge University Press, 1997. — (Cambridge Studies in Magnetism ; 3).
4. *Draeger U., Prévot M., Poidras T., Rüsager J.* Single-domain chemical, thermochemical and thermal remanences in a basaltic rock // *Geophysical Journal International*. — 2006. — Vol. 166, no. 1. — P. 12–32.
5. *Грибов С. К., Долотов А. В., Щербаков В. П.* Экспериментальное моделирование химической остаточной намагниченности и методики Телье на титаномагнетитсодержащих базальтах // *Физика Земли*. — 2017. — № 2. — С. 109–128.
6. *Shcherbakov V. P., Gribov S. K., Lhuillier F., Aphinogenova N. A., Tsel'movich V. A.* On the Reliability of Absolute Palaeointensity Determinations on Basaltic Rocks Bearing a Thermochemical Remanence // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2019. — Vol. 124, no. 8. — P. 7616–7632.
7. *Грибов С. К., Щербаков В. П., Цельмович В. А., Афиногенова Н. А.* Свойства ортогональных диаграмм и диаграмм Арай-Нагаты на титаномагнетитсодержащих базальтах с лабораторно индуцированными взаимно перпендикулярными термоостаточной и химической остаточной намагниченностями // *Физика Земли*. — 2025. — № 5. — С. 154–169.

8. *Shcherbakov V., Lhuillier F., Sycheva N.* Exact analytical solutions for kinetic equations describing thermochemical remanence acquisition for single-domain grains: Implications for absolute paleointensity determinations // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* — 2021. — T. 126, № 5. — e2020JB021536.
9. *Shcherbakov V., McClelland E., Shcherbakova V.* A model of multidomain thermoremanent magnetization incorporating temperature-variable domain structure // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* — 1993. — Vol. 98, B4. — P. 6201—6216.
10. *Kakol Z., Sabol J., Honig J. M.* Cation distribution and magnetic properties of titanomagnetites  $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  ( $0 \leq x < 1$ ) // *Physical Review B.* — 1991. — Vol. 43, no. 1. — P. 649—654.
11. *Bowles J. A., Jackson M. J., Berquó T. S., Sølheid P. A., Gee J. S.* Inferred time- and temperature-dependent cation ordering in natural titanomagnetites // *Nature Communications.* — 2013. — Vol. 4, no. 1. — P. 1916.
12. *O'Reilly W.* The identification of titanomaghemites: model mechanisms for the maghemitization and inversion processes and their magnetic consequences // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* — 1983. — Vol. 31, no. 1. — P. 65—76.
13. *Özdemir Ö., Dunlop D. J.* An experimental study of chemical remanent magnetizations of synthetic monodomain titanomaghemites with initial thermoremanent magnetizations // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* — 1985. — Vol. 90, B13. — P. 11513—11523.
14. *Fabian K., Shcherbakov V. P.* The magnetization of the ocean floor: stress and fracturing of titanomagnetite particles by low-temperature oxidation // *Geophysical Journal International.* — 2020. — Vol. 221, no. 3. — P. 2104—2112.
15. *Krása D., Shcherbakov V. P., Kunzmann T., Petersen N.* Self-reversal of remanent magnetization in basalts due to partially oxidized titanomagnetites // *Geophysical Journal International.* — 2005. — Vol. 162, no. 1. — P. 115—136.
16. *Грибов С. К.* Процессы однофазного окисления и последующего распада титаномагнетитов и их роль в магнетизме горных пород и палеомагнетизме : Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Грибов Сергей Константинович. — Москва, 2004. — С. 151.
17. *Néel L.* Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites // *Annales de Géophysique.* — 1949. — Vol. 5. — P. 99—136.

18. *Neel L.* Some theoretical aspects of rock-magnetism // *Adv. Phys.* — 1955. — Vol. 4. — P. 191—243.
19. *Thellier E., Thellier O.* Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique // *Annales de Géophysique.* — 1959. — Vol. 15. — P. 285—376.
20. *Shcherbakov V., McClelland E., Shcherbakova V.* A model of multidomain thermoremanent magnetization incorporating temperature-variable domain structure // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* — 1993. — Vol. 98, B4. — P. 6201—6216.
21. *Shcherbakova V., Shcherbakov V., Heider F.* Properties of partial thermoremanent magnetization in pseudosingle domain and multidomain magnetite grains // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* — 2000. — Vol. 105, B1. — P. 767—781.
22. *Монин А. С.* Тектоника Красноморского рифта в районе 18° с.ш. // *Геотектоника.* — 1985. — № 2. — С. 3—22.
23. *Трухин В. И., Максимочкин В. И., Жильева В. А., Шрейдер А. А., Кашиинцев Г. Л.* Магнитные и петрохимические свойства пород рифтовой зоны Красного моря // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия.* — М., 2007. — № 5. — С. 27—35.
24. *Курочкина Е. С.* Магнитные свойства подводных базальтов и эволюция рифтовой зоны Красного моря : Дис. ... канд. физ.-мат. наук / Курочкина Евгения Сергеевна. — Москва : Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 2007. — 103 с.
25. *Трухин В., Максимочкин В., Жильева В., Курочкина Е., Шрейдер А., Кашиинцев Г.* Магнитные свойства базальтов и геодинамические особенности рифтовой зоны юга Красного моря // *Физика Земли.* — Москва, 2006. — № 11. — С. 70—83.