

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
Грачева Романа Александровича
на тему: «Лабораторное моделирование низкотемпературного окисления
титаномагнетита для решения палеомагнитных задач»
по специальности 1.6.9. Геофизика**

Диссертация Р.А. Грачева посвящена палеомагнитной информативности пород с титаномагнетитом, претерпевшим однофазное окисление. Химическая намагниченность (CRM) при таком окислении всегда моложе возраста породы, но разница может варьировать от геологически синхронной до десятков миллионов лет. Вопрос в том, отражает ли остаточная намагниченность поле в момент формирования породы или поле времени образования CRM.

При однофазном окислении внешняя миграция вещества (кроме кислорода) отсутствует, процесс идет за счет диффузии кислорода в кристаллическую решетку. Окисление может начаться не сразу, а после появления доступа кислорода (подъем породы, низкотемпературный метаморфизм, приповерхностные условия).

Окисление происходит при температурах ниже 300–400°C, когда диффузия ионов замедлена и не позволяет образовать отдельные фазы (ильменит, гематит). Процесс типичен для океанических базальтов, охлаждаемых морской водой: титаномагнетит превращается в титаномаггемит, создающий мощные линейные магнитные аномалии.

Однофазное окисление – часто промежуточный этап. При дальнейшем нагреве катион-дефицитный титаномагнетит распадается на ильменит + магнетит (или гематит). Поэтому в древних породах идеальное однофазное окисление редко – оно "замораживается" только в быстро охлажденных молодых базальтах океанского дна.

Наиболее яркий пример – свежие базальты срединно-океанических хребтов. Быстрый подъем магмы, низкие температуры и ограниченный

доступ кислорода замедляют окисление. Состав титаномagnetитов однороден, а вторичные изменения сводятся к однофазному низкотемпературному окислению.

Вместе с тем, исследования показывают, что даже в этих условиях первичные магматические титаномagnetиты с очень высоким содержанием титана ($x > 0,75$) могут изначально не приобретать стабильную термоостаточную намагниченность (TRM) из-за слишком низкой температуры Кюри (например, Hoffman et al., 1984; Launay et al., 2017; Ubangoh et al., 2005).

Научная новизна работы и практическая значимость. Автором впервые разработана и апробирована методика лабораторного моделирования низкотемпературного однофазного окисления природного титаномagnetита при вторичном тепловом воздействии, связанном с внедрением магмы, позволяющая воспроизводить наложение вторичной химической остаточной намагниченности на первичную термоостаточную. Полученные данные крайне важны для интерпретации палеомагнитных результатов.

На примере образцов базальта Красного моря показано, что химическая остаточная намагниченность, формирующаяся при окислении выше точки Кюри исходной фазы, в экспериментах Телье–Кое занижает расчётное поле, причём занижение уменьшается с ростом степени окисления (Z).

Надёжность определения древнего поля методом Телье–Кое зависит от Z и от ориентации поля окисления относительно первичной TRM.

Диагностика однофазно-окисленного титаномagnetита и вторичной химической компоненты возможна по совокупности признаков: гомогенизации фазы при нагреве в аргоне и особенностям термо- и переменного размагничивания.

Впервые выявлено аномальное поведение компоненты, сонаправленной с полем отжига, которое выражается в её намагничивании

антипараллельно приложенному полю, указывающее на частичное самообращение при прогрессирующем однофазном окислении.

Структура и содержание работы.

Диссертационная работа содержит 128 страниц, состоит из Введения, 5 глав, Заключение и списка литературы, включая 30 рисунков и 8 таблиц. Работа завершается словарём терминов и списком литературы, насчитывающим 130 наименований.

В первой главе представлен литературный обзор, посвященный титаномагнетиту – ключевому минералу-носителю горных пород. Рассмотрены его фазовый состав и свойства (крайние компоненты Fe_3O_4 и Fe_2TiO_4 , катионное распределение, магнитная анизотропия, доменная структура), механизмы окисления (однофазное и с распадом твердого раствора), роль в палео- и петромагнетизме, а также изложена теория термоостаточной намагниченности (TRM) с законами Телье. В качестве объекта исследования выбраны базальты рифтовой зоны Красного моря.

К этой главе есть два замечания:

1. Объект исследований находится в южной части Красноморского рифта – достаточно сложном геологическом объекте, где наряду со спрединговыми процессами проявляется также плюмовый магматизм (Афар). Геологическое описание в диссертации выполнено преимущественно на основе работ 80-90-х годов, хотя за последние 3–5 лет по данной теме опубликовано более 200 работ, в том числе монографии. Представляется, что привлечение независимых изотопных и геохимических данных могло бы способствовать более корректному пониманию эволюции этого региона и интерпретации полученных результатов.

2. Выводы по этой главе написаны хорошим научным языком и охватывают ключевые темы работы. Однако они не вполне соответствуют формату «основных выводов» по главе. Основные выводы по Главе «Литературный обзор» должны быть краткими, тезисными и содержать либо новые конкретные данные, либо перечень вопросов, решаемых в

диссертации. Представленный текст больше напоминает литературное обобщение и является общеизвестным в палео- и петромагнетизме.

Во второй главе описаны использованное оборудование и методы исследований. Глава включает характеристику приборов (магнитометров, термомагнитных установок и др.), методики подготовки образцов и проведения экспериментов, а также исходные свойства образцов базальта П72-4, которые послужили базовым материалом для последующих сравнений и экспериментов по окислению и термонамагничиванию.

В третьей главе исследуются свойства химической остаточной намагниченности (CRM) титаномагнетита на разных стадиях окисления и возможность использования этой намагниченности для определения палеонапряженности методом Телье-Кое. Глава включает три раздела: в первом описана методика формирования искусственной CRM и проведения экспериментов Телье-Кое; во втором рассмотрено влияние степени окисления на фазовые, структурные и магнитные свойства титаномагнетита; в третьем представлена оценка величины магнитного поля, в котором формировались CRM и pTRM (парциальная термоостаточная намагниченность), с применением процедуры Телье-Кое. На примере изотермического отжига базальта П72-4 показано, что химическая остаточная намагниченность, образующаяся при однофазном окислении титаномагнетита выше точки Кюри исходной фазы, в процедуре Телье-Кое имеет спектр температур деблокирования, сходный с термоостаточной намагниченностью, но дает заниженные (на 16–55%) и при сильном окислении ненадежные значения расчетного поля, что обосновывает первое защищаемое положение.

В четвертой главе рассматривается влияние низкотемпературного однофазного окисления титаномагнетита на сохранность естественной остаточной намагниченности (NRM) в базальте. Глава включает четыре раздела: в первом описана методика лабораторного моделирования однофазного окисления; во втором проанализированы фазовые и магнитные

изменения, происходящие в образцах в процессе окисления; в третьем исследовано влияние окисления на направление NRM; в четвертом представлены результаты определения палеонапряженности методом Телье.

В пятой главе представлено моделирование окисления титаномагнетита, вызванного внедрением магмы (вторичным тепловым воздействием). Глава включает четыре раздела. Показано, что корректность определения поля методом Телье–Кое зависит одновременно от степени однофазного окисления и ориентации поля отжига: при параллельной ориентации поля окисления и первичной TRM надежные результаты достигаются при степени окисления до $Z \leq 0.5$, тогда как при перпендикулярной ориентации метод дает искаженные значения на любых стадиях, что обосновывает четвертое защищаемое положение о зависимости определяемой палеонапряженности от направления магнитного поля в процессе окисления.

Обоснованность положений, выносимых на защиту, и научных выводов, сформулированных в диссертации, является достаточной. Основные выводы базируются на представительном экспериментальном материале, полученном комплексом взаимодополняющих методов. Достоверность результатов обеспечена согласованностью данных термомагнитного анализа, гистерезисных измерений, данных температурной чистки и чистки переменным полем, а также экспериментов Телье–Кое. Выводы логически вытекают из представленных экспериментальных данных и отражены в 4-х научных статьях по теме диссертации.

К диссертационной работе Р.А. Грачева есть несколько замечаний:

1. Одной из целей проекта является выбор объекта исследования, в котором основным носителем магнитных свойств выступает ансамбль зёрен титаномагнетита без признаков однофазного окисления. В пятой главе обсуждается влияние вторичного нагрева от внедряющейся магмы, вызывающего окисление титаномагнетита и химическое перемагничивание, изменяющее первичную магнитную запись. В качестве объекта исследований

были выбраны образцы базальтов, отобранные в южной части Красного моря. На мой взгляд, это крайне неудачный выбор. Помимо того, что южная часть Красного моря представляет собой развитую стадию океанического спрединга, здесь также проявляется разновозрастное воздействие Афарского плюма, создающего уникальные термодинамические и геохимические условия. Высокая температура (до 1500°C) обеспечивает плавление пород на больших глубинах; гетерогенный источник (смесь мантийного перидотита с переплавленными фрагментами древней океанической коры) поставляет избыточные Fe и Ti; а фракционная кристаллизация при подъёме магмы концентрирует эти элементы, что в конечном итоге приводит к кристаллизации титаномагнетита. Кроме того, нельзя игнорировать влияние миоценовых эвапоритов (солей) и гидротермальных полей, в экосистемах которых доминирует не сера, а железо (например, van der Zwan et al., 2023). Микроорганизмы в таких условиях выступают в роли биокатализаторов, ускоряя реакцию окисления железа в тысячи раз по сравнению с абиотическими процессами.

2. Третье положение требует уточнения, поскольку в текущей формулировке оно преимущественно описывает наличие методики, но не раскрывает конкретный научный результат или эффект её применения. Защищаемое положение желательно сформулировать как утверждение, отвечающее на вопрос: «Что именно доказывается?»

3. Список литературы не совсем корректно оформлен – вне зависимости от выбранного порядка цитирования, согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018 (библиографическое описание), сначала располагаются источники на русском языке, затем на английском.

Заключение

Вместе с тем, указанные замечания носят дискуссионный характер и не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации

соответствует специальности 1.6.9. Геофизика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Грачев Роман Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9. Геофизика.

Официальный оппонент:

доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры динамической геологии
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Лубнина Наталия Валерьевна

08.06. 2026 г

Контактные данные: e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

Адрес места работы: 119234, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1,
комн. 820

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра
динамической геологии

Тел.: +7 (495) 939 2551; e-mail: