

**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**

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Р.А. Грачева посвящена решению одной из важных проблем палеомагнетизма — оценке сохранности палеомагнитной записи в породах, чей основной магнитный минерал (титаномагнетит) претерпел постмагматическое низкотемпературное окисление. Поскольку прямые наблюдения геомагнитного поля ограничены последними несколькими сотнями лет, термоостаточная намагниченность (TRM) магматических пород служит ключевым источником данных об эволюции поля в геологических масштабах времени. Однако окисление титаномагнетита в природе, как правило, приводит к образованию вторичной химической остаточной намагниченности (CRM), искажающей первичный палеомагнитный сигнал. Несмотря на многочисленные работы по этой теме за последние 60 лет, диагностика и тем более разделение вкладов TRM и CRM в естественную остаточную намагниченность (NRM) ансамблей неоднородных зерен представляет сложную задачу, что на практике часто может приводить к неоднозначной интерпретации палеомагнитных направлений и особенно определений палеонапряженности геомагнитного поля. Работа Р. А. Грачева, направленная на экспериментальное моделирование процессов окисления титаномагнетита и выработку критериев надежности палеомагнитных определений на образцах, претерпевших такое окисление, является безусловно актуальной как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Научная новизна и практическая значимость

Автором впервые разработаны и апробированы оригинальные методики лабораторного моделирования однофазного окисления титаномагнетита в слабом магнитном поле, воспроизводящие два возможных в природе сценария: высокотемпературное окисление выше точки Кюри исходного титаномагнетита, что приводит к образованию CRM в чистом виде, и низкотемпературное окисление, накладывающееся на частично сохраненную TRM, моделирующее вторичное тепловое воздействие интрузии. Новые результаты, полученные диссертантом, включают следующее:

1. Обнаружено, что CRM, образованная выше температуры Кюри исходного титаномагнетита, обладает спектром деблокирующих температур, сходным с таковым для TRM. В результате при определении поля образования намагниченности методом Телье-Кое соблюдается линейный характер диаграмм Арай-Нагаты, но оцененная по ним величина поля оказывается систематически занижена (до 50% на ранних стадиях), причем степень занижения уменьшается с ростом окисления.
2. Впервые показано, что надежность определения палеонапряженности на окисленных базальтах методом Телье-Кое критически зависит от ориентации относительно первичной TRM действовавшего во время окисления магнитного поля: при параллельной ориентации и умеренной степени окисления ($Z \leq 0.5$) поле образования первичной TRM еще возможно определить с довольно небольшой ошибкой, тогда как при перпендикулярной ориентации определения ненадежны независимо от стадии окисления.
3. Предложены диагностические признаки вторичной CRM («гомогенизация» температур Кюри при нагреве в аргоне, аномальный рост компоненты намагниченности в направлении поля образования CRM при размагничивании переменным полем), что имеет

практическое значение для интерпретации палеомагнитных данных по базальтам океанической коры и рифтовых зон.

Структура и содержание работы

Диссертация содержит 128 страниц, состоит из Введения, 5 глав, Заключения и списка литературы (130 наименований), иллюстративный материал включает 30 рисунков и 8 таблиц. Логика изложения традиционна и не вызывает возражений: работа открывается обзором литературы (глава 1), затем в главе 2 следует описание использованных экспериментальных методов и характеристика исходного материала (базальт П72-4 Красного моря), обосновывающая выбор именно этого объекта как модельного (псевдооднодоменные зерна, отсутствие природного окисления, стабильность к нагревам в аргоне) и наконец в главах 3-5 описываются экспериментальные результаты.

Не останавливаясь подробно на первых двух главах, перейду непосредственно к обсуждению полученных автором результатов.

Глава 3 посвящена моделированию «чистой» CRM при путем отжига образца в магнитном поле при температуре выше точки Кюри исходной титаномагнетитовой фазы. Показано, что с ростом длительности отжига температура Кюри образующейся фазы увеличивается до 450–480 °С, отражая рост степени окисления (Z). Намагниченность насыщения растёт, а коэрцитивная сила сначала снижается, а затем возрастает, что соответствует переходу от однофазного окисления к началу оксираспада при времени отжига 110 ч. Эксперимент по методу Телье-Кое даёт систематически заниженные оценки поля образования намагниченности (от 42 до 84 мкТл при истинном поле 100 мкТл), причём занижение уменьшается с ростом Z (с 58% до 16%). Для образца с признаками начавшегося оксираспада высокотемпературный интервал даёт ещё более сильное занижение (до 72%), связанное с минералогическими изменениями в ходе эксперимента. Отметим, однако, что смоделированная CRM разрушается не полностью даже при температурах 570-580 °С (рис. 3.6), в том числе и для образцов с

минимальными временами отжига, что, возможно, отражает начало оксираспада с образованием фазы с соответствующими температурами Кюри. Таким образом, в условиях данного эксперимента (температура отжига 355 °С) однофазное окисление и оксираспад, видимо, не являются взаимоисключающими процессами.

В главе 4 низкотемпературное однофазное окисление титаномагнетита базальта П72-4 экспериментально моделируется путем отжига при 260 °С (медианная температура Кюри) в поле 50 мкТл, ориентированном под углом 110° к исходной TRM, представляющей собой неразмагниченный при нагреве до 260 °С остаток исходной естественной остаточной намагниченности. Показано, что окисление надёжно диагностируется по эффекту гомогенизации – возврату температуры Кюри к исходному значению при нагреве в аргоне; степень окисления Z возрастает от 0.15 (12.5 ч) до 0.42-0.69 (1300 ч), причем на поздних стадиях окисление уже становится явно неоднородным по объему образца. С ростом окисления величина NRM снижается на 25%, намагниченность насыщения растёт, а коэрцитивные параметры падают. Наблюдалось аномальное поведение компоненты намагниченности, направленной вдоль поля отжига (рост на начальных этапах размагничивания переменным полем), интерпретируемое как признак частичного самообращения намагниченности, обусловленного магнитостатическим взаимодействием окисленной оболочки и ядра зерна. При невысоких степенях окисления (до $Z \approx 0.3$) температурное размагничивание позволяет восстановить исходное направление NRM, при $Z > 0.35$ – уже нет. Метод Телье-Кое в низкотемпературном интервале (270–360°С) даёт формально приемлемые, но систематически заниженные (на 16–21%) оценки палеонапряжённости, причем они стремятся к величине поля окисления, тогда как высокотемпературный интервал (360–480°С) оказался непригоден.

Глава 5 является ключевой с точки зрения применения к задачам палеомагнетизма, поскольку моделирует наиболее распространённый в

природе сценарий: вторичное тепловое воздействие интрузии на породу, уже обладающую намагниченностью термоостаточной природы. В отличие от главы 3 (окисление при температурах выше точки Кюри исходной фазы) и главы 4 (окисление при температурах ниже точки Кюри части исходной фазы с сохранением части первичной NRM), сначала создается исходная лабораторная TRM, затем разрушается её низкотемпературная часть с блокирующими температурами $T_b < 260$ °C, и уже на фоне этого магнитного состояния путем отжига на воздухе при 260 °C происходит однофазное окисление и формирование вторичной CRM в магнитном поле $B_{an} = 50$ мкТл. При этом используются две предельные ориентации поля отжига: параллельно исходной TRM и перпендикулярно ей, что позволяет изучить, как направление поля, действовавшего во время однофазного окисления, влияет на сохранность палеомагнитного сигнала. Показано, что однофазное окисление (вплоть до $Z \sim 0.56$) диагностируется по росту температуры Кюри и её возврату к исходным значениям при нагреве в аргоне, увеличению намагниченности насыщения и снижению коэрцитивности. При размагничивании переменным полем и температурой CRM и pTRM разделяются только в случае перпендикулярной ориентации полей; при параллельной – коэрцитивные спектры и спектры деблокирующих температур перекрываются настолько, что разделение компонент становится невозможным. Наиболее важным результатом для палеомагнитной практики следует считать, что метод Телье-Кое даёт надёжные определения величины древнего поля (отклонение $\leq 5\%$) только при параллельной ориентации поля окисления и умеренной степени окисления ($Z \leq 0.5$). При перпендикулярной ориентации оценки палеонапряженности оказываются систематически искажены (завышены на ранних стадиях, занижены на поздних).

Замечания к содержанию и оформлению работы

1. Нигде явно не оговаривается, как было направлено лабораторное поле в ходе экспериментов Телье-Кое. Между тем, результаты главы 5 дают

основание предположить, что направление лабораторного поля могло оказать влияние на оценки «палеонапряженности».

2. Результаты определения «палеонапряженности» везде даются без соответствующих абсолютных ошибок. Приводятся лишь относительные ошибки $\sigma(b)$ определения наклона линейных участков диаграмм Араи-Нагаты.

3. Рисунок 1.1 воспроизведен по очень старой публикации О'Рейлли и Бэнерджи (1965, ссылка 27 в списке литературы). Почему было не взять рисунок того же содержания из работы Каколя и др., также цитируемой автором (ссылка 32)?

4. Стилистические недочеты. В ряде случаев одни и те же предметы именуется по-разному, например «ульвошпинель» и «ульвёшпинель» или «блокирующая/деблокирующая температура» и «температура блокирования/деблокирования». В первом случае следовало бы остановиться на написании «ульвошпинель», рекомендуемом современными минералогическими словарями (например, словарь В. Г. Кривовичева, изд-во СПбГУ, 2008). Во втором случае, в литературе по палеомагнетизму и магнетизму горных пород явно преобладает первое написание, которого и стоило придерживаться.

Заключение

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационной работы Р.А. Грачева, представляющей собой законченное научное исследование, выполненное на современном экспериментальном уровне. В ней решена важная научная задача – установлено влияние однофазного окисления титаномагнетита в магнитном поле на палеомагнитную информативность базальтов, разработаны методики лабораторного моделирования и предложены диагностические критерии для разделения первичной TRM и вторичной CRM. Полученные результаты имеют фундаментальное значение для физики магнетизма горных пород и

должны быть приняты во внимание в практике палеомагнитных исследований.

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 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 :
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики Земли
физического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета,
КОСТЕРОВ Андрей Александрович

01.06. 2026 г

Контактные данные:

e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: без шифра, Структура и эволюция литосферы

Адрес места работы:

199034, Россия г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9,
Санкт-Петербургский государственный университет,
физический факультет, кафедра физики Земли
Тел. +7 812 428 7300; e-mail: