

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ, ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

КУРОЧКИНА Евгения Сергеевна

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОДВОДНЫХ БАЗАЛЬТОВ И
ЭВОЛЮЦИЯ РИФТОВОЙ ЗОНЫ КРАСНОГО МОРЯ**

**Специальность: 25.00.10. – геофизика, геофизические методы
поиска полезных ископаемых**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Москва - 2007

Работа выполнена на кафедре физики Земли физического факультета
Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор физико-математических наук,
профессор

Трухин Владимир Ильич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук,
профессор

Прудников Валерий Николаевич

доктор геолого-минералогических наук,
профессор

Булычев Андрей Александрович

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

ЯГТУ “Ярославский Государственный Технический Университет”

Защита состоится « » мая 2007г. в _____ на заседании Диссертационного совета Д
501.001.63 в Московском Государственным Университете им. М.В. Ломоносова по
адресу: 119992, Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, ауд. .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета
Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « 24 » апреля 2007г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д501.001.63
кандидат физико-математических наук

В.Б.Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы.

Магнитное поле Земли играет важную роль в жизни нашей планеты. Оно регулирует, в основном, солнечно-земные взаимодействия, защищает поверхность Земли от проникновения из космоса частиц высокой энергии, которые оказывают губительное действие на живую и неживую природу.

Природные ферромагнетики (самородные элементы, окислы железа, сульфиды железа) – важнейшие носители природной остаточной и индуктивной намагниченности горных пород. Ферромагнитные минералы, обладая замечательной особенностью – «магнитной памятью», могут дать сведения о направлении древних геомагнитных полей, температурах и давлениях, при которых проходило формирование того или иного участка литосферы.

Палеомагнитные исследования позволяют получать новые знания об эволюции магнитного поля Земли, процессе формирования дна и магнитоактивного слоя Мирового океана. Задача ученых состоит в том, чтобы расшифровать геофизическую, геологическую и минералогическую информацию, полученную на основе изучения ферромагнитных минералов. Решение этой задачи, как и любой обратной задачи, невозможно без привлечения дополнительных данных. Необходимо иметь информацию о минералах, входящих в состав пород земной коры, и их магнитных свойствах. Большое значение имеет изучение процессов намагничивания ферромагнитных минералов, содержащихся в горных породах, в геомагнитном поле, исследование роли термодинамических факторов и времени их воздействия на горную породу.

Очень важным для понимания развития земной коры является исследование рифтовых зон мирового океана. Изучение магнетизма горных пород рифтовых зон актуально для понимания проблем, связанных с тектоническими процессами сложнопостроенных участков

океанской коры. В настоящее время накоплено немало информации о магнитных свойствах подводных океанских базальтов. Эти исследования необходимо продолжать, так как каждый регион имеет свою специфику термодинамического и тектонического происхождения, свои особенности формирования магнитоактивного слоя, формирования и динамики магнито-минералогических характеристик пород.

Согласно геологическому строению литосферы, Красное море находится на границе Африканской и Аравийской литосферных плит. Изучавшиеся в работе базальты, были отобраны в районе рифтогенеза, имели сравнительно небольшой геологический возраст. Они являются хорошим материалом для моделирования различных физико-химических процессов, происходящих на дне океанов с течением времени.

Цель работы.

В данной работе была поставлена цель подробного комплексного исследования магнитных свойств подводных базальтов Красного моря, дно которого по сути своей является зоной молодого рифтообразования, а также анализ геолого-геофизических проблем эволюции рифтовой зоны Красного моря на основе полученных результатов.

Решались следующие задачи:

1. Измерение магнитных характеристик базальтов и установление особенностей их магнитных свойств и происхождения естественной остаточной намагниченности I_n .
2. Проведение детального термомагнитного анализа образцов базальтов и определение фазового состава магнитных зерен.
3. Анализ распределения магнитных характеристик базальтов в зависимости от их месторасположения.

4. Установление связи между магнитными свойствами базальтов и условиями их образования и эволюции.

5. Анализ геолого-геофизических проблем происхождения и палеотектоники рифтовой зоны Красного моря на основе полученных результатов.

Научная новизна работы.

Впервые проведено подробное исследование магнитных свойств базальтов рифтовой зоны Красного моря в объеме, позволившем проследить корреляционные связи между их магнитными параметрами. Выявлены закономерности распределения магнитных и минералогических характеристик базальтов в зависимости от месторасположения. Выявлены особенности условий формирования данного участка рифтовой зоны Красного моря.

Достоверность результатов.

Характеристики аппаратуры по пространственно-временному разрешению, стабильности параметров и калибровок измерительных систем, а также методики экспериментов, обработки и анализа данных обеспечивают надежность результатов измерений. Оценки погрешностей измерений свидетельствуют о достоверности и высокой степени обоснованности научных положений и выводов.

Практическая ценность.

Полученные результаты измерений, установленные особенности магнитных свойств подводных базальтов и выводы об условиях формирования рифтовой зоны Красного моря могут быть применены для дальнейшего изучения рифтовых зон Мирового океана и тектонических процессов, происходящих на границах литосферных плит.

Защищаемые положения.

1. Базальты Красного моря сильно различаются по степени однофазного окисления ферримагнитной фракции. Причиной данного явления является различный геологический возраст пород, а также особые условия дна Красного моря. Наличие признаков гетерофазного окисления ферримагнитной фракции на небольшой группе красноморских базальтов объясняется присутствием локальных термодинамических воздействий.

2. Большие значения величин I_n и фактора Кенигсбергера Q_n определяют высокую палеоинформативность подводных базальтов Красного моря. Для базальтов, ферримагнитная фракция которых представлена титаномагнетитом, находящимся на стадии однофазного окисления, установлено, что высокие величины фактора Кенигсбергера Q_n обусловлены преимущественно однодоменной структурой зерен титаномагнетита в этих базальтах.

3. Близкое расположение мест отбора образцов с различной степенью окисления ферримагнитной фракции, а также широкий спектр размеров ферримагнитных зерен в составе базальтов свидетельствуют о том, что рифтовая зона Красного моря имеет очень сложную палеотектоническую историю. Установлены отличительные магнитные свойства базальтов, отобранных из районов трансформных смещений. Анализ их физико-химических свойств позволил сделать вывод, что отдельные локальные участки красноморского рифта характеризуются сложным процессом формирования – горные породы этих областей подвергались воздействию дополнительных термодинамических факторов.

Личный вклад автора.

Работая в лаборатории геомагнетизма кафедры физики Земли физического факультета МГУ, автор принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях, проводившихся на коллекции подводных базальтов рифтовой зоны красного моря. Автором работы были внесены уточнения в существующие представления об эволюции данного региона. Автор принимал участие в обсуждении и подготовке публикаций полученных результатов, вошедших в диссертационную работу.

Апробация работы.

Материалы диссертационных исследований докладывались автором на научной конференции “Ломоносовские чтения (Секция физика)” (апрель 2005, 2006, 2007) и на международной научной конференции по магнетизму “Moscow International Symposium on Magnetism” (июнь 2005). Основные результаты работы опубликованы в сборниках тезисов докладов соответствующих конференций и в научном журнале: “Физика Земли” (2004 г. и 2006 г.) (см. список публикаций автора).

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и выводов, изложенных на 100 стр. машинописного текста, и включает 29 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 89 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, профессору Владимиру Ильичу Трухину, за постановку интересной задачи, за научное руководство, за плодотворные научные дискуссии и благожелательное отношение.

Большое спасибо коллективу лаборатории Геомagnetизма кафедры физики Земли физического факультета МГУ, на которой была выполнена настоящая работа, в особенности, зав. лабораторией профессору Валерию Ивановичу Максимочкину, чьими советами и консультациями автор пользовался на протяжении многих лет. Автор искренне признателен старшему научному сотруднику лаборатории Валерии Александровне Жиляевой за постоянную заботу и поддержку. Спасибо за поддержку Версан Татьяне Александровне, Наталии Сергеевне Безаевой, Сердюк Валентине Михайловне, Петрунину Геннадию Ивановичу, Ворониной Елене Викторовне и всем сотрудникам кафедры физики Земли.

Большое спасибо за постоянную поддержку Казаковой Надежде Николаевне, а также всем сотрудникам физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, которые помогали мне советами и рекомендациями.

Хочу выразить особую благодарность моим оппонентам – профессору Прудникову Валерию Николаевичу и профессору Бульчеву Андрею Александровичу, а также оппонировавшей организации – Ярославскому Государственному Техническому Университету.

Большое спасибо за понимание и поддержку моим родителям и друзьям.

Содержание работы.

Во введении сформулированы цель работы, ее актуальность, представлен объект исследования.

В главе 1 дан обзор геомагнитных исследований океанских базальтов различных регионов Мирового океана на основе опубликованных ранее в литературе работ. Описаны некоторые

особенности океанской коры. Приведены основные представления о формировании океанской коры в рифтовых зонах в соответствии с концепцией тектоники литосферных плит. Показано, что информация о древнем магнитном поле, а также об условиях формирования магнитных минералов (а, следовательно, и горных пород, в которых эти минералы встречаются), несет естественная остаточная намагниченность I_n . В этой главе дан обзор магнитных свойств подводных базальтов, ферримагнитная фракция которых представлена титаномагнетитом. Отмечено, что основным видом магнитоминералогических изменений ферримагнитной фракции базальтов в условиях дна океана является низкотемпературное окисление. Большое влияние на изменение магнитных характеристик и, в первую очередь, на изменение I_n , оказывает первая стадия низкотемпературного окисления – однофазное окисление.

На основе анализа литературных данных показаны основные закономерности изменения магнитных характеристик базальтов. Отмечено, что по мере однофазного окисления титаномагнетита происходит перестройка доменной структуры частиц, приводящая к уменьшению I_n и к росту, коэрцитивной силы и, соответственно, стабильности к различным разрушающим факторам (магнитные поля, повышенные температуры, химические воздействия).

Показано, что как распад титаномаггемита на обогащенную титаном фазу и магнетит, так и низкотемпературное окисление титаномаггемита, могут в некоторых случаях привести к самообращению остаточной намагниченности. Вкратце описано явление самообращения остаточной намагниченности, представлены основные возможные механизмы этого явления.

Применительно к базальтам рифтовой зоны Красного моря отмечено, что на этих объектах можно достаточно эффективно проводить лабораторное моделирование термоостаточной намагниченности ($I_{ТТ}$) при последовательном нарастании степени однофазного окисления.

В главе 2 приведено описание района исследования и изученных образцов базальтов. Приведена карта мест отбора образцов и карта аномального геомагнитного поля исследуемого региона, представлены основные данные о тектоническом строении и эволюции рифтовой зоны Красного моря (на основе литературных данных).

Описание изученных образцов базальтов включает в себя краткое изложение результатов исследования минералогических и петрохимических характеристик подводных базальтов рифтовой зоны Красного моря (по литературным данным), а также особенностей магнитных свойств базальтов этого региона, установленных другими авторами.

В главе 2 также описана методика измерения различных магнитных характеристик исследуемых базальтов. Вкратце дано описание аппаратуры, на которой проводились измерения. Приведена оценка ошибок измерения магнитных параметров.

В главе 3 представлены результаты экспериментальных исследований коллекции базальтов Красного моря. *В разделе 3.1* описаны результаты изотермических исследований подводных базальтов Красного моря. Приведены данные природных магнитных характеристик I_n , k_0 , $Q_n = I_n/k_0 H_T$ всех изученных образцов, представлены соотношения между их средними значениями. Показаны соотношения между некоторыми изотермическими характеристиками базальтов, такими как фактор Кенигсбергера Q_n , параметр I_{rs}/I_s , характеризующий размеры ферримагнитных зерен (рис.1), параметры магнитной жесткости и величина поля половинного размагничивания.

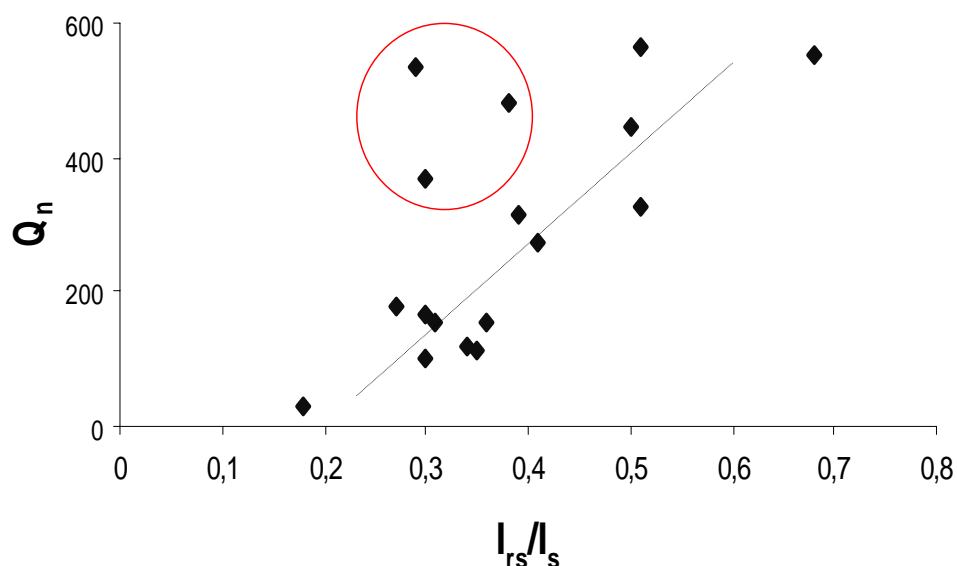


Рис.1 Зависимость фактора Кенигсбергера Q_n от соотношения I_{rs}/I_s . Кругом объединены образцы, ферримагнитная фракция которых находится на стадии гетерофазного окисления. У всех остальных базальтов ферримагнитная фракция находится на стадии однофазного окисления.

Из рис.1 видно, для однофазно-окисленных базальтов наблюдается тенденция роста Q_n с увеличением I_{rs}/I_s . Для некоторых базальтов параметр I_{rs}/I_s близок к величине, характерной для ансамбля однодоменных зерен ($I_{rs}/I_s=0,5$ для одноосных магнитных зерен). Можно утверждать, что ферримагнитная фракция таких базальтов представлена зернами малого размера, близкими по структуре к однодоменным.

В этом же разделе описаны результаты экспериментов по исследованию стабильности естественной остаточной намагниченности по отношению к размагничивающему переменному полю.

В разделе 3.2. приведены результаты комплексного термомагнитного анализа образцов. На образцах базальтов исследовалась температурная зависимость намагниченности насыщения I_s и остаточной намагниченности насыщения I_{rs} . Учитывая эти результаты, была сделана оценка степени окисления титаномагнетитовых зерен исследованных базальтов. Анализ экспериментальных данных показал, что все образцы можно разделить на три группы (табл.1).

В 1-ю группу были выделены образцы с $T_{CO} \leq 220^{\circ}C$ и достаточно низкими величинами $H_c \leq 20$ мТл и $H_{cr} \leq 25$ мТл. Во 2-ю группу вошли

образцы с точками Кюри $213 \div 320^{\circ}\text{C}$ и высокими величинами магнитной жесткости: $H_c=(39 \div 75)\text{мТл}$, $H_{cr}=(47 \div 125)\text{мТл}$. Образцы 3-ей группы характеризовались наличием двух магнитных фаз: точка Кюри низкотемпературной фазы колебалась от 325°C до 384°C , а высокотемпературной фазы - от 450°C до 510°C . Образцы 3-й группы имели также, как и образцы 2-ой группы, высокие величины $H_c=(30 \div 42)\text{мТл}$ и $H_{cr}=(42 \div 58)\text{мТл}$.

Таблица 1. Магнитные характеристики базальтов дна южной части Красного моря до и после нагрева образцов до 600°C .

Образец	I_n , А/м	k_0 , $\cdot 10^{-3}$ ед.СИ	I_{rs0} , А/м	H_{c0} , мТл	H_{cr0} , мТл	T_C , $^{\circ}\text{C}$	T_B , $^{\circ}\text{C}$	$I_{rs0}/$ I_{s0}	$I_{sT}/$ I_{s0}	$H_{cT}/$ H_{c0}
1 группа										
П 62-1(2)	68,6	16,6	1100	19	24	203	225	0,36	1,31	1,05
П 61-1(2)	73,5	16,2	959	16	21	206	220	0,30	1,29	1,50
П 72-5(4)	46,4	17	821	14	18	203	230	0,30	1,4	1,28
П 68-2(4)	78,8	10,6	1123	20	25	195	230	0,41	1,57	1,10
П 70-4(5)	80,8	16,8	913	15	20	221	220	0,27	1,49	2,00
П 72-3(5)	23	27,3	650	9	14	209		0,18	1,38	1,56
П 71-3(6)	50,2	16,4	847	16	20	172	210	0,35	1,85	1,25
2 группа										
П 57(3)	84,9	5,7	895	44	56	257	290	0,68	1,39	0,70
П 66-1(3)	34,5	3,89	923	52	62	253	320	0,51	1,27	0,79
П 66-4(3)	88,2	7,3	1123	39	47	213	240	0,50	1,45	0,85
П 59-2(3)	25,8	2,6	303	47	62	282	320	0,30	1,29	0,87
П 53(4)	13	4,1	207	56	75	323	320	0,34	1,16	0,86
П67(2)	15,6	3,8	323	48	75	350	300	0,31	1,3	0,34
П 62-3(3)	51,6	3,4	700	75	125	315	310	0,51	1,35	0,93
3 группа										
П 65-1(4)	44	3,05	274	30	42	384	470/ 510	0,29	1,13	0,90
П 65-1(1)	40,7	3,12	375	42	58	325	330/ 480	0,38	1,12	0,67
П 65-4(5)	68,5	8	478	38	49	325	350/ 450	0,39	1,21	1,00

Для исследованных образцов были рассчитаны спектры блокирующих температур, которые позволяют определять долю ферримагнетика, разблокировавшегося в каком-либо интервале

температур. Спектр блокирующих температур большинства образцов размыт. Это может свидетельствовать о том, что в образцах присутствует титаномагнетит с различной степенью окисления.

В таблице 1 представлены основные магнитные характеристики базальтов дна южной части Красного моря до и после нагрева образцов до 600°C .

По результатам термомагнитного анализа определены зависимости различных магнитных параметров базальтов от величин их точек Кюри: параметров магнитной жесткости, относительного изменения намагниченности насыщения I_s образцов после нагрева до 600°C , параметра I_n/I_{rs} , характеризующего степень сохранности палеомагнитной информации.

По магнитным данным были определены особенности строения рифтовой зоны Красного моря.

На основе анализа особенностей характера распределения изодинам геомагнитного поля в рифтовой зоне Красного моря были выделены области трансформных смещений. Было показано, что магнитные свойства базальтов, отобранных из областей трансформных смещений, сильно отличаются от магнитных свойств остальных базальтов. Близкое расположение мест отбора образцов с различной степенью окисления ферримагнитных зерен свидетельствует о локальном характере воздействия природных факторов. На основе данных о магнитных свойствах изученных образцов базальтов было проведено уточнение положения одного из отрезков оси рифта, расположенного в северной части полигона.

Для установления особенностей формирования рифтовой зоны Красного моря проводилось сравнение магнитных свойств базальтов Красного моря и океанских базальтов из других рифтовых зон Мирового океана: хребтов Буве, Шписс, Рейкьянес и трансформного разлома Романш (перечисленные объекты расположены в разных частях

Атлантического океана). Показано, что образцы Красного моря выделяются высокой остаточной намагниченностью I_n и фактором Кенигсбергера Q_n , при этом средняя величина магнитной восприимчивости k не сильно отличается от значений k для других регионов. Показано, что аномально высокие величины фактора Кенигсбергера Q_n базальтов Красного моря с высокой степенью однофазного окисления объясняются преобладанием в ферримагнитной фракции образцов мелких однодоменных зерен.

Низкая степень корреляции между магнитными характеристиками образцов базальтов Красного моря свидетельствует о высокой дисперсности магнитных свойств базальтов, связанной, вероятно, с различной измененностью исходных титаномагнетитовых зерен, обусловленной либо различными термодинамическими воздействиями, либо существенным различием в возрасте пород.

Чтобы уточнить данные о составе зерен ферримагнитной фракции базальтов, был проведен микронзондовый анализ образцов. По результатам этого анализа (в силу особенностей прибора, на котором проводился анализ) обоснованные выводы удалось сделать только для образцов базальтов 1-ой группы. На рис.2 представлено изображение поверхности образца из первой группы (П72-5), полученное в отраженных электронах с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения Supra 50 VP.

Анализ химического состава ферримагнитных зерен образца П72-5, проведенный с помощью сканирующего микроскопа, показал, что содержание ульвошпинели в титаномагнетитовых зернах в данном образце составляет $x=0,53$.

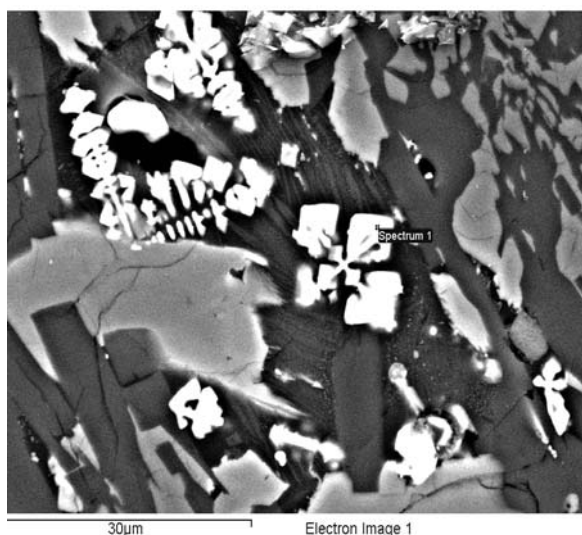


Рис.2. изображение поверхности образца П72-5, полученное в отраженных электронах с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения Supra 50 VP

По диаграмме зависимости точек Кюри от параметра окисления и содержания титана расчетная точка Кюри образца П72-5 равна примерно 200°C , что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

На двух образцах коллекции было проведено моделирование процесса однофазного окисления в морской воде.

Эксперименты показали, что:

1. На обоих образцах наблюдался рост $T_{\text{В}}^*$ после временных выдержек при повышенных температурах. При этом, согласно зависимости $I_{\text{ГТ}}(T)$ ферримагнитная фракция оставалась однофазной. Таким образом, проведение экспериментов в воде позволило локализовать именно процесс однофазного окисления титаномагнетита, исключив возможность гетерофазного окисления.

2. Величины $I_{\text{ГТ}}$, полученные на образцах после нагрева и выдержки в воде, в основном, больше, чем $I_{\text{ГТ}}$, полученные от той же температуры на воздухе после того, как образцы прошли все циклы прогревов. Это можно объяснить смещением спектра блокирующих температур в сторону больших температур.

3. $I_{ГТ}$ полученная на образцах непосредственно после выдержек в воде больше, чем аналогичная $I_{ГТ}$, полученная в результате нагрева до той же температуры на воздухе. Большая величина $I_{ГТ}$ образующаяся в результате отжига в воде может объясняться протеканием термовязких процессов диффузионной природы, протекающих под действием магнитного поля и температуры при температурах меньше точки Кюри.

В главе 4 проводится обсуждение полученных результатов.

Раздел 4.1 посвящен анализу особенностей магнитных свойств подводных базальтов Красного моря.

Комплексное исследование магнитных характеристик подводных базальтов рифтовой зоны Красного моря позволило выявить ряд особенностей, характерных для данного региона.

Было установлено, что фазовый состав ферримагнитной фракции базальтов, определенный по результатам термомагнитного анализа, различен. Среди образцов встречаются как базальты, титаномагнетитовые включения которых находятся на ранней стадии однофазного окисления, так и те, в которых титаномагнетит находится на стадии гетерофазного окисления.

Для базальтов с признаками однофазного окисления ферримагнитных зерен наблюдается явная зависимость увеличения Q_n с ростом параметра $I_{ГТ}/I_s$.

Параметр $I_{ГТ}/I_s$, зависящий от размеров ферримагнитных зерен, для базальтов второй группы, за исключением взятых из зон трансформных разломов, близок к величине, характерной для ансамбля однодоменных ферримагнитных зерен. Можно утверждать, что ферримагнитная фракция таких базальтов представлена зернами малого размера, близкими по структуре к однодоменным. Мелкие размеры ферримагнитных зерен, как правило, обусловлены большой скоростью охлаждения магмы при формировании базальтов. Согласно термомагнитному анализу,

титаномагнетит в составе этих базальтов находится на поздней стадии однофазного окисления. С точки зрения кинетики магнетоминералогических процессов данное явление закономерно, т.к. более мелкие ферромагнитные зерна легче подвергаются окислению под действием подводного выветривания.

У образцов третьей группы параметр I_n/I_{rs} , характеризующий степень сохранности палеомагнитной информации, заметно выше, чем у образцов первой и второй групп. Этот факт можно объяснить тем, что титаномагнетит этих базальтов подвергся *in situ* гетерофазному окислению в результате вторичного разогрева до температуры выше точки Кюри их исходной фазы, в результате чего образовалась вторичная термоостаточная намагниченность на гетерофазно-окисленной фазе с $T_C=450-510^{\circ}\text{C}$. Титанистый магнетит, который образуется в результате гетерофазного окисления титаномагнетита имеет большую спонтанную намагниченность, чем I_s исходного титаномагнетита. Поэтому, если природная термоостаточная намагниченность сформировалась на уже гетерофазно-окисленном титаномагнетите, I_n таких образцов должна быть больше чем I_n базальтов, титаномагнетитовые зерна которых находятся на стадии однофазного окисления.

Проведенные эксперименты по моделированию процесса низкотемпературного окисления, происходящего в естественных условиях, позволили установить, что большая величина $I_{ГТ}$ образующаяся в результате отжига в воде может объясняться протеканием термовязких процессов диффузионной природы, протекающих под действием магнитного поля и температуры при температурах меньше точки Кюри.

Возможно наличие очень больших величин I_n (до 108 А/м) и Q_n (до 2700), полученных для дублей тех же образцов, что и в данной работе, но на более «свежих» базальтах (20 лет назад) другими авторами, было обусловлено наличием термовязкой компоненты диффузионной природы исходной намагниченности.

Для оценки относительной скорости протекания окислительных процессов в базальтах Красного моря были привлечены литературные данные о величине энергии активации при однофазном окислении. Было показано, что окислительные процессы в базальтах в условиях Красного моря, температура воды на дне которого значительно выше, чем в других океанах, могут идти в несколько раз быстрее, чем в других регионах Мирового океана. Возможно, это является одной из причин того, что в рифтовой зоне Красного моря обнаружены образцы базальтов, сильно различающиеся по степени однофазного окисления, которые были отобраны на достаточно близком расстоянии друг от друга.

Раздел 4.2. посвящен геофизическим аспектам полученных результатов.

Установлено, что характер распределения магнитных характеристик образцов не дает явного подтверждения применимости теории раздвига литосферных плит к данному региону. Характер геодинамических процессов и строение рифтовой зоны Красного моря представляется нам значительно более сложным, нежели для большинства описанных в литературе рифтовых зон Мирового океана.

Анализ распределения магнитных и минералогических характеристик базальтов в зависимости от их месторасположения показал, что образцы, ферримагнитная фракция которых находится на стадии гетерофазного окисления, наблюдаются в зонах так называемых трансформных смещений. При этом значения I_n и Q_n этих базальтов очень высокие. Среди базальтов, ферримагнитные зерна которых находятся на стадии однофазного окисления, образцы имеют большой разброс по степени окисления. Такое распределение магнитных характеристик базальтов и отсутствие единой картины линейного распределения магнитных аномалий свидетельствует о том, что эволюция дна Красного моря представляет собой очень сложный процесс.

Допустимо сделать вывод, что базальты коллекции сильно различаются по возрасту. Принимая во внимание высокие значения I_n и Q_n базальтов, титаномагнетитовые зерна которых находятся на стадии гетерофазного окисления, можно сказать, что окисление их ферромагнитной фракции произошло на стадии формирования базальтов. Эти исследования позволили выделить области дна, испытавшие дополнительное воздействие термодинамических факторов.

Таким образом, область рифтовой зоны Красного моря по характеру формирования отличается от других областей молодого рифтообразования Мирового океана. Причина этого явления, в данном случае, это особый характер геотектонических процессов, протекающих на границе Африканской и Аравийской литосферных плит.

В заключении подведены итоги комплексного исследования магнитных свойств базальтов Красного моря. Выделены основные особенности условий формирования горных пород и эволюции рифтовой зоны Красного моря.

На основе проведенных исследований сделаны следующие выводы.

Физические выводы.

1. Значительный разброс величин магнитных параметров (I_n , Q_n , T_C , I_{rs}/I_s) базальтов Красного моря свидетельствует о широком спектре размеров зерен титаномагнетита, входящего в состав базальтов, разнообразии концентрации ферромагнитных включений и степени их окисления. Отличие в корреляционных связях между магнитными параметрами красноморских базальтов по сравнению с базальтами других регионов позволило утверждать, что для базальтов Красного моря наблюдается наличие вторичных изменений.

2. Данные о величинах I_{rs}/I_s базальтов, стабильности I_n к воздействию переменного магнитного поля, микрондовый анализ образцов, а также сравнительный анализ магнитных характеристик красноморских базальтов и базальтов других регионов Мирового океана

позволили утверждать, что аномально высокие величины фактора Кенигсбергера Q_n базальтов Красного моря, ферримагнитная фракция которых находится на стадии однофазного окисления, обусловлены мелкими размерами зерен титаномагнетита в этих базальтах.

3. Высокие значения I_n и Q_n базальтов, ферримагнитная фракция которых находится на стадии гетерофазного окисления, обусловлены особенностями термодинамических условий формирования океанской коры в областях, где были отобраны эти образцы.

Геофизические выводы.

1. Особенности магнитных свойств образцов базальтов, драгированных со дна рифтовой зоны юга Красного моря, свидетельствуют о сложном характере эволюции земной коры в этом регионе.

2. Базальты Красного моря сильно различаются по степени окисления ферримагнитной фракции, что свидетельствует об их различном геологическом возрасте, а также о возможном геологическом возрасте Красного моря. Допустимо предположить, что каталитическим фактором, повлиявшим на ход процесса однофазного окисления ферримагнитной фракции красноморских базальтов является повышенная температура воды на дне Красного моря по сравнению с другими регионами Мирового океана.

3. Наличие в областях трансформных разломов базальтов, содержащих титаномагнетит с признаками гетерофазного окисления, свидетельствует о том, что данные зоны по своему тектоническому происхождению отличаются от других областей красноморского рифта. Возможно, базальты этих регионов подверглись воздействию дополнительных термодинамических факторов. Возможно, также, давление кислорода в извергающейся магме в силу тектонических

особенностей этих участков больше, чем в областях, где магнитные аномалии имеют линейный характер.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

1. В.И. Трухин, В.А. Жилиева, Е.С. Курочкина, *Самообращение намагниченности природных титаномагнетитов*, Физика Земли. 2004. №6. С.42-53.

2. В.И. Трухин, Е.С. Курочкина, *Физика обратного намагничивания горных пород*, Сборник тезисов докладов научной конференции Ломоносовские чтения (Секция физики), Апрель 2005, стр.126-128.

3. V.I. Trukhin, N. Bezaeva, E. Kurochkina, *The paleomagnetic field and possible mechanisms for the formation of reverse rock magnetization*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, International Conference “Moscow International Symposium on Magnetism”, Russia, Moscow, June 25-30, 2005 (см. также Books of abstracts of MISM, Moscow, 2005, p.698)

4. В.И. Трухин, В.И. Максимочкин, В.А. Жилиева, Е.С. Курочкина, *Особенности магнитных свойств и условий формирования базальтов рифтовой зоны Красного моря*, Сборник тезисов докладов научной конференции Ломоносовские чтения (Секция физики), Апрель 2006, стр.181-184.

5. В.И. Трухин, Е.С. Курочкина, В.И. Максимочкин, *Особенности образования естественной остаточной намагниченности красноморских базальтов*, Сборник тезисов докладов научной конференции Ломоносовские чтения (Секция физики), Апрель 2006, стр.184-188.

6. В.И. Трухин, В.И. Максимочкин, В.А. Жилиева, Е.С. Курочкина, А.А. Шрейдер, Г.Л. Кашинцев, *Магнитные свойства базальтов и*

геодинамические особенности рифтовой зоны юга Красного моря, 2006, Физика Земли. №11. с.70-83.

7. В.И. Трухин, Е.С. Курочкина, В.И. Максимочкин, *Моделирование изменения термоостаточной намагниченности природных титаномагнетитов в условиях дна океана, Сборник тезисов докладов научной конференции Ломоносовские чтения (Секция физики), Апрель 2007, стр.180-183.*