

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.382.3

МАГНИТНЫЕ И ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД РИФТОВОЙ ЗОНЫ КРАСНОГО МОРЯ

**В. И. Трухин, В. И. Максимочкин, В. А. Жилыева, А. А. Шрейдер,
Т. Л. Кашинцев**

(кафедра физики Земли)

E-mail: maxvi@mail.ru

По результатам исследований магнитных и петрохимических свойств базальтов, отобранных из рифтовой зоны южной части Красного моря в районе 18° с.ш., сделаны выводы об условиях их образования и эволюции. Установлены два этапа образования базальтов, различающиеся по скорости поступления магмы и окислительно-восстановительным условиям. По особенностям магнитных свойств базальтов и аномального геомагнитного поля выявлены участки, где породы испытали повышенные термодинамические воздействия (тектонические напряжения, деформации, нагревы и т. д.). Оценены условия формирования естественной остаточной намагниченности базальтов.

Введение

Земная кора является верхней оболочкой Земли, наиболее доступной для исследования и для использования ее природных ресурсов. В начале 1950-х гг. было установлено, что кора океанов и кора континентов существенно различны по своему строению. Океанская кора (толщина примерно 6 км) тоньше континентальной (примерно 30 км), возраст океанской коры не превышает 200 млн лет, тогда как возраст континентальной достигает 3 млрд лет.

Дно океана состоит из океанских котловин, срединных океанских хребтов, глубоководных желобов и континентальных окраин.

Породы океанского дна содержат сильномагнитные базальты, которые создают интенсивные геомагнитные аномалии. По обе стороны от осей Срединно-Атлантического и других срединно-океанских хребтов обнаружены чередующиеся полосы положительных и отрицательных аномалий интенсивностью до 1000 нТл.

Океанские хребты относительно узки и изрезаны, вдоль их гребней идут отчетливо выраженные глубокие впадины, которые называются срединными рифтами. Именно в рифтовых долинах происходит активное магмоизвержение. При охлаждении магмы и кристаллизации подводных базальтов они намагничиваются и создают наиболее интенсивные геомагнитные аномалии. Океанские магнитные аномалии и подводные базальты, являющиеся источниками этих аномалий, несут очень ценную информацию о возникновении океанского дна и его истории. Большой интерес для исследователей представляют также рифтовые зоны морей и глубоководных озер (например, Байкал).

В геолого-геофизической концепции новой глобальной тектоники предполагается, что поступление магмы в рифтовых зонах приводит к разрастанию (спредингу) океанского дна.

Магнитные характеристики базальтов рифтовой зоны Красного моря

Наша работа посвящена исследованию магнетизма молодой рифтовой зоны Красного моря, дно которого давно привлекает внимание исследователей разных специальностей [1–4].

В центральной части дна моря проходит рифтовая зона. В районе 17°56' наблюдается трансформный разлом, смещающий центральную ось рифта (она же — ось предполагаемого спрединга) на 3 км. К северу от разлома в экспедиции на НИС «Акванавт» в 1981 г. проводились детальные исследования.

По характеру магнитного поля полигон неоднороден. В центре его четко выделяется магнитная аномалия, имеющая вид уступа. Градиентной зоне магнитной аномалии соответствует интенсивно расчлененный рельеф дна с наличием депрессий и возвышенностей с перепадом высот около ± 150 м при средней глубине, близкой к 1500 м. Прямой связи аномального геомагнитного поля (АГП) с рельефом дна обнаружено не было, однако влияние отдельных морфоструктур сказывается в локальном положении изодинам.

По градиентному участку осевой аномалии было выделено положение оси спрединга (ось рифта). Ось рифта в пределах района исследований представляла собой отрезки длиной в несколько километров со смещением от центра в несколько сотен метров.

Осевая магнитная аномалия имеет амплитуду около 1000 нТл и длину волны 10 км.

В работах [3, 4] было проведено подробное изучение магнитных свойств обломков базальтов, поднятых в 1981 г. с помощью аппарата «Пайсис» со дна красноморского рифта. На образцах, выпиленных из обломков, были измерены естественные магнитные параметры: остаточная намагниченность I_n , магнитная восприимчивость κ_0 — и определен фактор $Q_n = I_n/\kappa_0 H_g$ (H_g — напряженность геомагнитного поля в месте отбора образцов). Были также измерены гистерезисные магнитные характеристики: намагниченность и остаточная намагниченность насыщения (I_s , I_{rs}), коэрцитивная и остаточно-коэрцитивная силы (H_c , H_{cr}), коэффициенты магнитной вязкости S — и проведен подробный термомагнитный анализ образцов базальтов. В работе [4] было установлено, что образцы красноморских базальтов характеризуются очень сильным разбросом естественных магнитных параметров $I_n = 12.3 \div 107.9$ А/м, $\kappa_0 = (0.26 \div 2.61) \cdot 10^{-2}$, $Q_n = I_n/\kappa_0 H_g = 41 \div 571$. Для базальтов с $\kappa_0 > 10^{-2}$ можно было наблюдать некоторую тенденцию уменьшения I_n с ростом восприимчивости. Для образцов базальтов с малыми величинами κ_0 в основном характерны высокие величины Q_n , за исключением образцов П67 ($\langle \kappa_0 \rangle = 3 \cdot 10^{-3}$, $\langle Q_n \rangle = 157$).

Термомагнитными исследованиями [4] было установлено, что породы части коллекции (образцы 1-й группы) обладают магнитными свойствами, присущими молодым океанским базальтам. Они имеют точки Кюри T_c и точки блокирования T_b менее 230°C . Титаномагнетитовые зерна в них находятся на начальной стадии процесса однофазного окисления, характерного для всех океанских базальтов. Часть образцов базальтов имела большие величины T_c и T_b ($240 \div 320^\circ\text{C}$), что свидетельствует о более высокой степени однофазного окисления титаномагнетитовых зерен (образцы 2-й группы). Обнаружены также образцы базальтов с признаками гетерофазного окисления, которое является последней стадией окисления титаномагнетита. Эти образцы имели двухфазную ферримагнитную фракцию с температурами блокирования $T_{b1} = 330 \div 350^\circ\text{C}$ и $T_{b2} = 450 \div 510^\circ\text{C}$.

Наши результаты термомагнитного анализа соответствовали выводам авторов статьи [5, 6] о том, что в титаномагнетитовых зернах подводных базальтов в условиях дна океана ($T < 20^\circ\text{C}$) с течением времени протекает процесс окисления. Первой стадией этого процесса является низкотемпературное однофазное окисление. С ростом степени окисления происходит увеличение T_c ферримагнитных зерен и разрушение первичной остаточной намагниченности термоостаточной природы. Однако на образцах исследованной нами коллекции [4] четкого уменьшения I_n с ростом точки Кюри обнаружено не было.

На образцах с высокой степенью окисления титаномагнетитовых зерен ($T_c > 300^\circ\text{C}$) наблюдались как низкие величины I_n (примерно 13 А/м, образцы П53 и П67), так и высокие величины I_n (примерно 68.5 А/м, обр. П65-4). Базальты, отобранные вблизи отрезков оси рифта [4], в основном характеризуются более высокими величинами I_n (обр. П66-4, П57, П68, $I_n = 67.1-107.9$ А/м), нежели базальты, отобранные из других зон (П67, П66-1, П65, $I_n = 12.3-46.8$ А/м). Возможно, это связано с различием в возрасте пород, а возможно, с различием структурного и фазового состояния ферримагнитной составляющей.

Как известно, величина остаточной намагниченности породы зависит от типа и концентрации в ней ферримагнитных зерен, а также их размеров. Степень сохранности первичной I_n зависит от окисления ферримагнитных зерен, а также других термодинамических воздействий на породу. Отношение $I_n/I_{rs} = V_r$ в меньшей степени зависит от размеров зерен и их концентрации. Чем более стабильна во времени первичная намагниченность I_n , тем больше должно быть это отношение [7]. Большие значения параметра Q_n также, вероятно, характеризуют большую степень сохранности первичной I_n . При протекании процессов низкотемпературного окисления титаномагнетитов в условиях дна океана, которые вызывают рост точек Кюри, следует ожидать разрушения первичной остаточной намагниченности и уменьшения параметра Q_n и отношения I_n/I_{rs} . Однако у сильноокисленных образцов изученной коллекции с высокими T_c встречались как образцы с низкими значениями $Q_n < 150$ и $I_n/I_{rs} < 0.06$ (обр. П67 и П53), так и образцы с высокими значениями $Q_n = 330-580$, $I_n/I_{rs} = 0.1-0.16$ (обр. П65-1, П65-4, П62-3). Значения Q_n и I_n/I_{rs} части образцов с высокими T_c оказались даже выше, чем значения аналогичных параметров образцов базальтов ($Q_n < 200$, $I_n/I_{rs} = 0.09$) с малыми значениями точек Кюри ($T_c < 200^\circ\text{C}$). Очевидно, такое различие в магнитных свойствах невозможно объяснить влиянием только низкотемпературного окисления. Причины таких особенностей магнитных свойств базальтов, отобранных из рифтовой зоны Красного моря, вероятно, надо искать в различии термодинамических условий образования и эволюции отдельных блоков земной коры в этом районе, возраст которых не превышает 1 млн лет [1]. В работе [4] было высказано предположение, что базальты с высокой степенью окисления титаномагнетитовых зерен и высокими величинами I_n и Q_n испытали *in situ* повышенные термодинамические воздействия (тектонические напряжения, разогрев и др.). Трудно объяснить случаи, когда некоторые образцы базальтов с низкими T_c (низкой степенью окисления) имели низкие величины I_n , Q_n , I_n/I_{rs} , а образцы с высокими T_c — высокие величины I_n , Q_n , I_n/I_{rs} . Возможно, это связано с различием в содержании титана в титано-

магнетитовых зернах, так как большие величины T_c можно объяснить не большей степенью окисления, а меньшим содержанием титана и тогда частично можно объяснить большие величины I_n , Q_n , I_n/I_{rs} .

Вследствие этого нами был проведен совместный анализ результатов исследования магнитных и геолого-геохимических свойств коллекции образцов базальтов красноморского рифта с целью установления особенностей их образования и соответственно особенностей эволюции земной коры в этом районе.

Петрохимические характеристики образцов базальтов Красного моря

По петро-геохимическим данным коллекцию образцов базальтов красноморского рифта, отобранных в районе $17^{\circ}58'$ с.ш. и $40^{\circ}04'$ в.д., можно разделить на две группы (таблица). Наиболее молодые базальты вскрываются непосредственно в экстрезивной зоне, так как они практически не перекрыты осадками или слабо припорошены ими. Базальты второй, предположительно более «древней» группы обнажаются по обе стороны от центральной экстрезивной зоны и перекрыты более заметной толщей осадков от 20 см до 1 м.

Основными показателями измененности породы являются содержание в ней воды и степень окисления стекла и вкрапленников, что отражается в появлении вторичных минералов [2]. Петрографические наблюдения не устанавливают наличия таких мине-

ралов. Содержание воды в базальтах не превышает 0.45 мас.%, что характерно для всех свежих толетов центральных частей рифтовых зон океанов. Общая степень окисления F , выраженная отношением $Fe^{3+}/\Sigma Fe$, в базальтах Красного моря в среднем составляет 0.13. Статистический анализ стекол основного состава из рифтовых зон Мирового океана [8] дает среднюю величину этого отношения, равную 0.12 ± 0.02 , т.е. они идентичны. Степень такого изменения зависит от времени экспозиции базальтов на поверхности раздела порода-морская вода (осадок, насыщенный водой). В таком случае более древние базальты второй группы должны быть более окисленными, нежели базальты экстрезивной зоны (первая группа). Однако на самом деле наблюдается обратная тенденция. Базальты первой группы при одинаковом содержании H_2O имеют более высокую степень окисленности (верхнее поле на рис. 1,а; таблица). В таком случае представляется, что окисленность базальтов является первичным процессом, связанным с особенностями кристаллизации расплавов на разных этапах его поступления к поверхности. Можно предположить, что первые более ранние порции магмы поступали вверх в условиях начальных этапов растяжения коры, когда система магматических камер еще была в состоянии неполной открытости и в них преобладала восстановительная среда. Застойность магматических камер в этих условиях приводила к дифференциации расплава. Это хорошо видно

Геохимические характеристики (в мас.%) базальтов красноморского рифта на 18° с.ш.

Тип	№ обр.	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ +FeO	H ₂ O	F, %	N, %
1-й	П59-1 ×	0.84	1.64	8.80	10.44	0.22	16	13.9
	П59-2 ×	0.88	3.04	7.72	10.76	0.44	28	5.8
	П53-1 ×	1.14	1.45	9.87	11.32	0.30	13	11.8
	П53-4 ×	1.20	2.84	8.62	11.46	0.26	25	4.3
	П62-1 ×	1.09	1.35	9.87	11.22	0.45	12	4.9
	П62-2 ×	0.89	2.40	9.16	11.56	0.29	21	—
	П62-3 ×	1.04	0.55	10.59	11.14	0.28	5	3.0
	П70-2	1.12	1.83	8.99	10.82	0.26	17	2.0
2-й	П67 ×	1.30	0.55	10.77	11.32	0.22	5	6.3
	П61-1	1.30	1.65	9.69	11.34	0.45	15	—
	П71-3	1.20	1.35	9.51	10.86	0.33	12	11.4
	П68-2	1.50	0.95	10.77	11.72	0.39	8	5.0
	П65-2 ×	0.78	0.85	7.90	8.75	0.15	10	15.0
	П65-3 ×	0.90	0.56	8.51	9.07	0.13	6	—
	П66-1 ×	1.30	0.63	10.34	10.97	0.43	6	2.7
	П57	0.84	1.93	7.00	8.93	0.25	22	11.7
	П72-5	1.14	1.15	9.69	10.84	0.22	11	1.9

Примечание: × — образцы из предполагаемых зон трансформных смещений; $F = \frac{Fe_2O_3}{Fe_2O_3+FeO}$;

N — степень раскристаллизации (суммарное количество вкрапленников плагиоклаза, оливина и пироксена трех генераций, %).

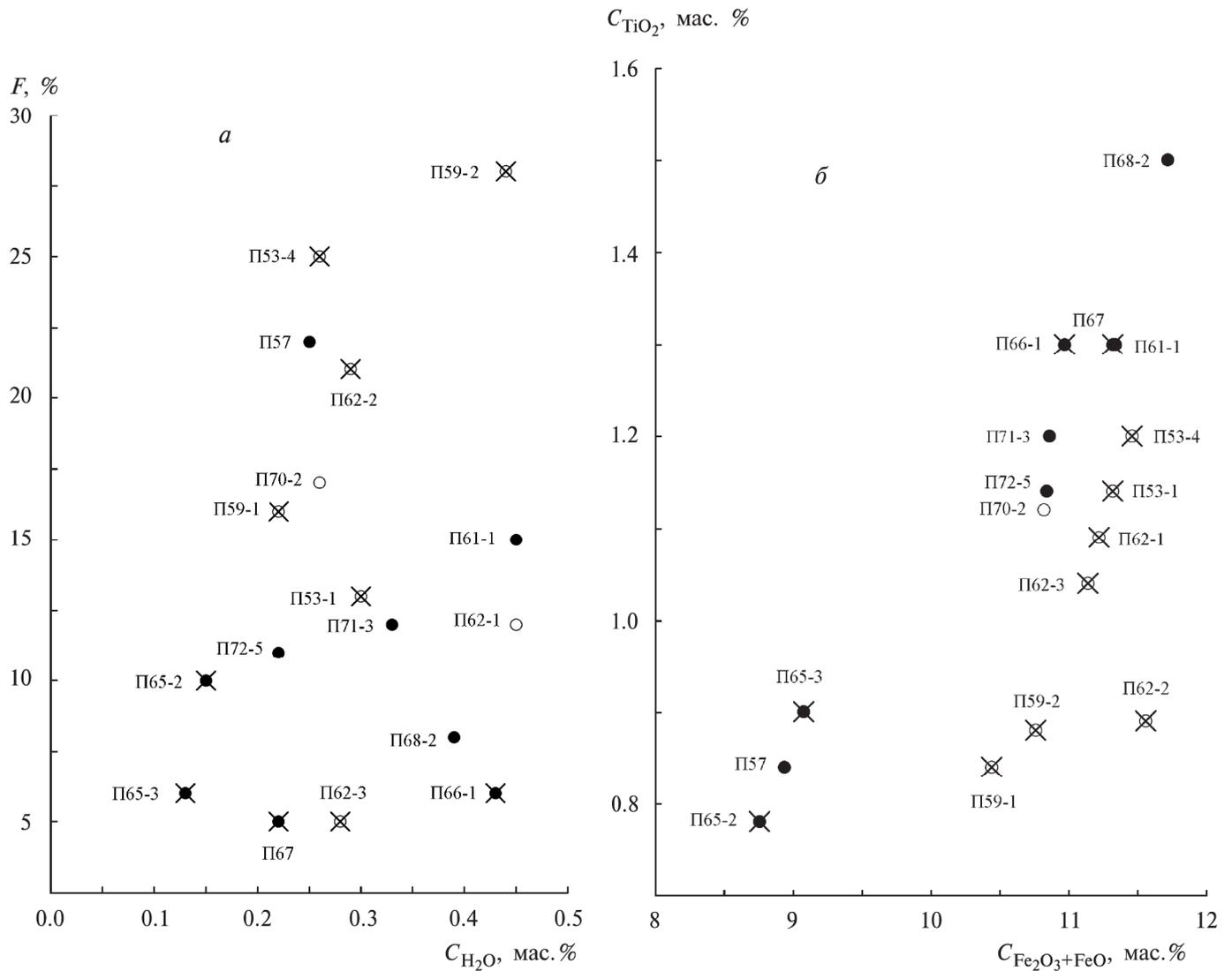


Рис. 1. Геохимические данные: а — соотношение между степенью окисления базальтов F и содержанием воды в них; б — соотношение между содержанием TiO_2 и содержанием $(Fe_2O_3 + FeO)$ в базальтах; о — образцы 1-го типа; • — образцы 2-го типа; x — образцы из предполагаемых зон трансформных смещений

на графике $TiO_2 - (Fe_2O_3 + FeO)$ (рис. 1, б), где точки анализов базальтов второй группы образуют два различных поля, особенно резко отличаясь по содержанию TiO_2 . По мере увеличения раскрытия рифта магмовыводящая система становилась все более открытой, что приводило к увеличению в ней потенциала кислорода. Это в свою очередь обусловило большую степень окисленности базальтов первой группы.

В целом по петрохимическим данным все базальты красноморского рифта в исследуемом районе являются совершенно свежими с точки зрения измененности их субстрата.

Сопоставление магнитных и петро-геохимических характеристик базальтов

Очевидно, что магнитные свойства ферримагнитных минералов, входящих в состав базальта,

должны быть генетически связаны с концентрацией окислов титана и железа в породе, степенью окисления базальта (таблица).

Как известно [9], точка Кюри T_c титаномагнетита, входящего в состав базальтов, зависит от степени его окисления и содержания в нем титана. Однако явной корреляции между степенью окисления F изученных образцов базальтов и их точкой Кюри нами не обнаружено.

Высокую точку Кюри имели ферримагнитные зерна базальтов как с низкой степенью окисленности (образцы станций П62-3, П65 и П67), так и с высокой (образцы станций П57, П53, П59-2). Образцы со средней степенью окисления базальта имели, как правило, низкие точки Кюри. Не обнаружена также корреляция между T_c и содержанием окиси титана в базальте (рис. 2, б). Такое несоответствие может быть связано с особенностями

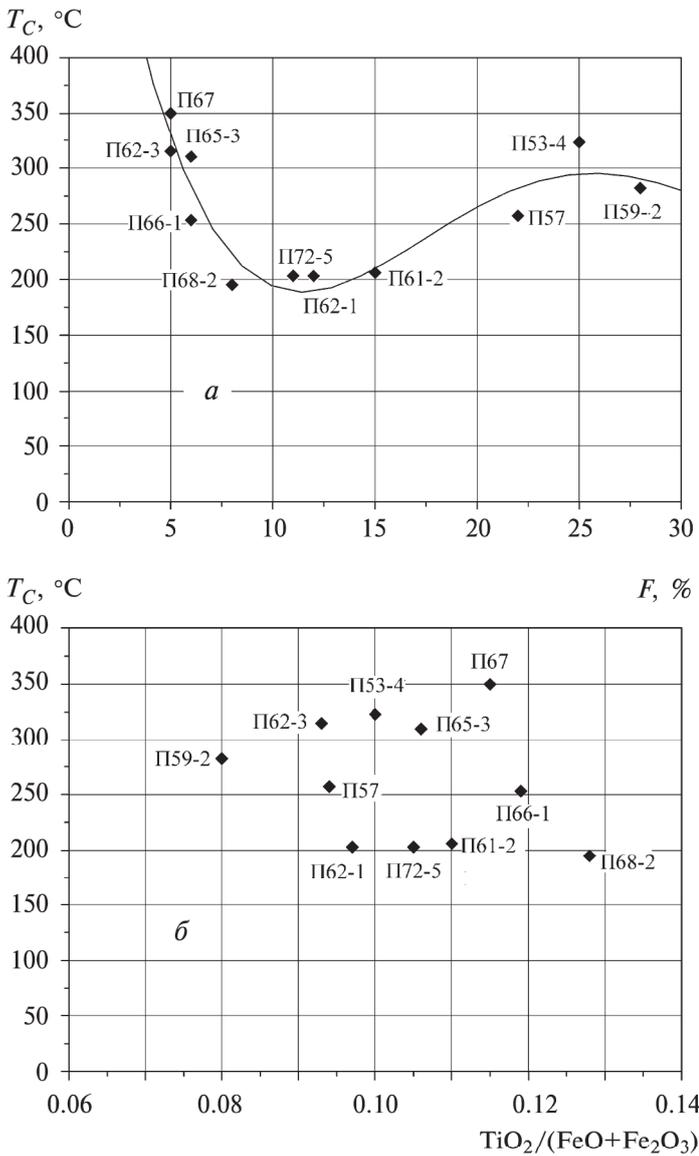


Рис. 2. Температуры Кюри T_c базальтов с различной степенью окисления F (а) и относительным содержанием TiO_2 (б)

формирования магнитных свойств базальтов в зонах трансформных смещений. Как видно из рис. 3, эти зоны довольно хорошо идентифицируются по особенностям АГП — наличию искажений в структуре изодинам модуля АГП. Такое искажение связано, вероятно, с тем, что базальты в этих зонах (обр. П53, П62-1, -2, -3, П65, П66-1, П67) испытали воздействие повышенных термодинамических факторов. Вследствие этого скорость окисления титаномагнетита в них после воздействия сдвиговых напряжений могла вырасти [10]. Следует ожидать, что и другие магнитные свойства базальтов, отобранных из этих зон, будут зависеть не только от скорости охлаждения лавы и условий образования титаномагнетита, но также и от термодинамических воздействий в течение последующей геологической истории. Это находится в соответствии с геохи-

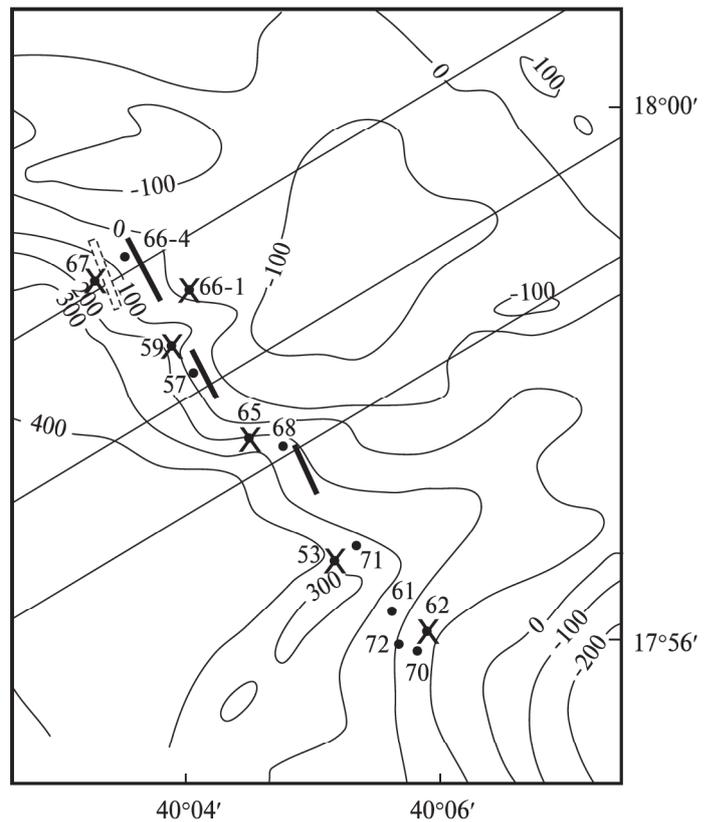


Рис. 3. Карта аномального магнитного поля. Нанесены линии изодинам в нТ, отрезки оси рифта и места отбора образцов базальтов

мическими данными, согласно которым базальты, отобранные из зон предполагаемых трансформных смещений, являются более «древними» и, следовательно, могли подвергаться тектоническим воздействиям.

Выше было отмечено, что величина намагниченности пород пропорциональна концентрации в ней магнитных зерен. Также известно, что величина термоостаточной намагниченности растет с уменьшением размеров зерен и ростом их коэрцитивной силы [11]. Следовательно, нормированная естественная остаточная намагниченность термоостаточной природы, определяемая как отношение I_n/I_s , где I_s — намагниченность насыщения, не должна зависеть от концентрации ферромагнитных зерен и должна расти с ростом коэрцитивной силы базальта. Такую закономерность следует ожидать, если большая часть первичной остаточной намагниченности сохранена. Как видно из рис. 4, для большей части исследованных образцов базальтов с низкими точками Кюри наблюдается увеличение нормированной естественной остаточной намагниченности с ростом их коэрцитивной силы. В эту же зависимость укладываются образцы П65-4, П65-1 и П57 с повышенными величинами точки Кюри ($T_c = 257–384^\circ C$). Как видно из рис. 4, была обнаружена группа образцов, обладающих повышенными по сравнению с образцами первой группы

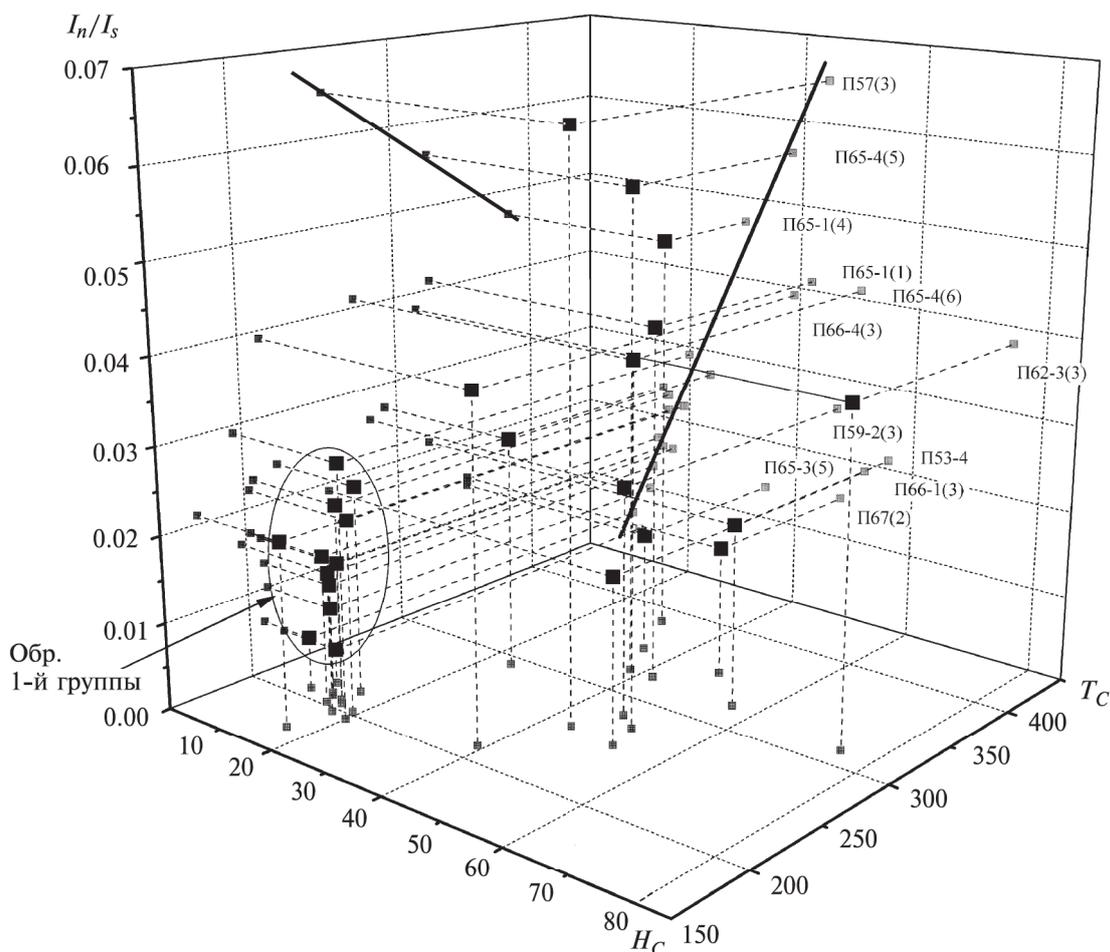


Рис. 4. Нормированная естественная остаточная намагниченность I_n/I_s образцов, имеющих различные величины коэрцитивных сил H_c и температур Кюри T_c

величинами коэрцитивной силы и пониженными величинами нормированной естественной остаточной намагниченности. Можно сделать вывод, что первичная остаточная намагниченность этих образцов значительно разрушена. Сопоставление этих данных с распределением АГП и геохимическими данными показывает, что образцы этих базальтов отобраны из предполагаемых зон трансформных смещений.

Коэрцитивная сила, которая зависит от размеров зерен, внутренних напряжений и дефектов кристаллической решетки, для образцов, отобранных из зон предполагаемых трансформных смещений, имеет относительно высокие величины $H_c = 30 \div 75$ мТл и малые $\kappa_0 < 10^{-2}$. После нагрева их в лаборатории до 600°C наблюдалось уменьшение коэрцитивной силы, связанное, вероятно, с отжигом внутренних напряжений, в то время как на образцах базальтов из «спокойных» зон (образцы 1-й группы) коэрцитивная сила в основном растет после аналогичного лабораторного воздействия (рис. 5). Такая же закономерность наблюдалась нами ранее на базальтах из разломных зон Атлантики [12–14]. В работе [15] сообщалось о повышенных величинах постоянных магнитной вязкости S_{00} у базальтов, отобранных из

разломных зон. Исследования магнитной вязкости образцов базальтов, отобранных из зон предполагаемых трансформных смещений красноморского рифта [16], показали, что постоянная магнитной вязкости S_v таких образцов (П65, П67, П59) имеет повышенные величины (0.72–1.88 мТл) (рис. 6). Образцы, отнесенные к группе 1, имели низкие величины магнитной вязкости от 0.08 мТл до 0.25 мТл.

Если проанализировать связь между величиной V_r и степенью окисления титаномагнетита исследованных образцов базальтов, то можно отметить, что на образцах с самой низкой степенью однофазного окисления прямой связи между V_r и T_c нет, а наблюдается некоторый разброс V_r , связанный в основном с повышенной магнитной жесткостью ферритмагнитных зерен [4]. Это подтверждается увеличением нормированной естественной остаточной намагниченности с ростом коэрцитивной силы этих образцов (рис. 4). На образцах с высокой степенью окисления, отобранных в основном из зон трансформных смещений, также наблюдались как высокие величины V_r , так и низкие. Низкие значения V_r можно объяснить разрушением I_n *in situ* под действием тектонических напряжений, а также

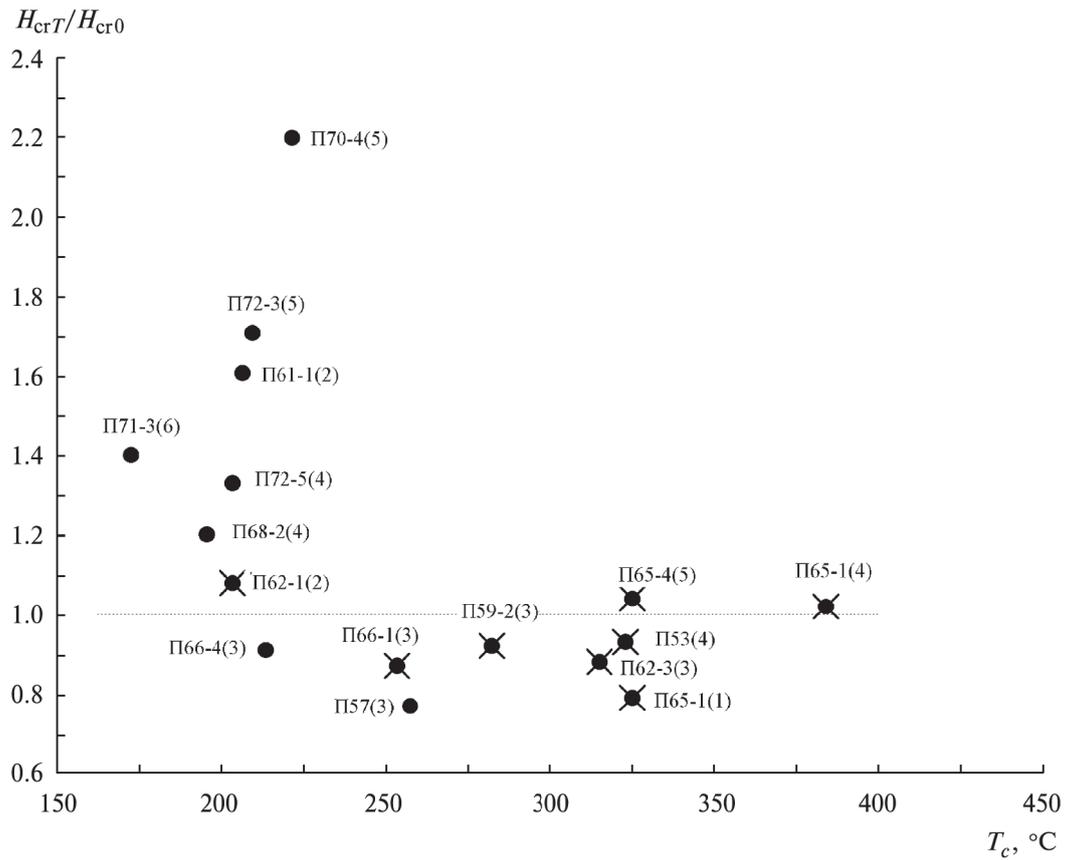


Рис. 5. Изменение остаточно-коэрцитивной силы H_{cr} образцов базальтов с различными температурами Кюри T_c после их нагрева до $T = 600^\circ\text{C}$

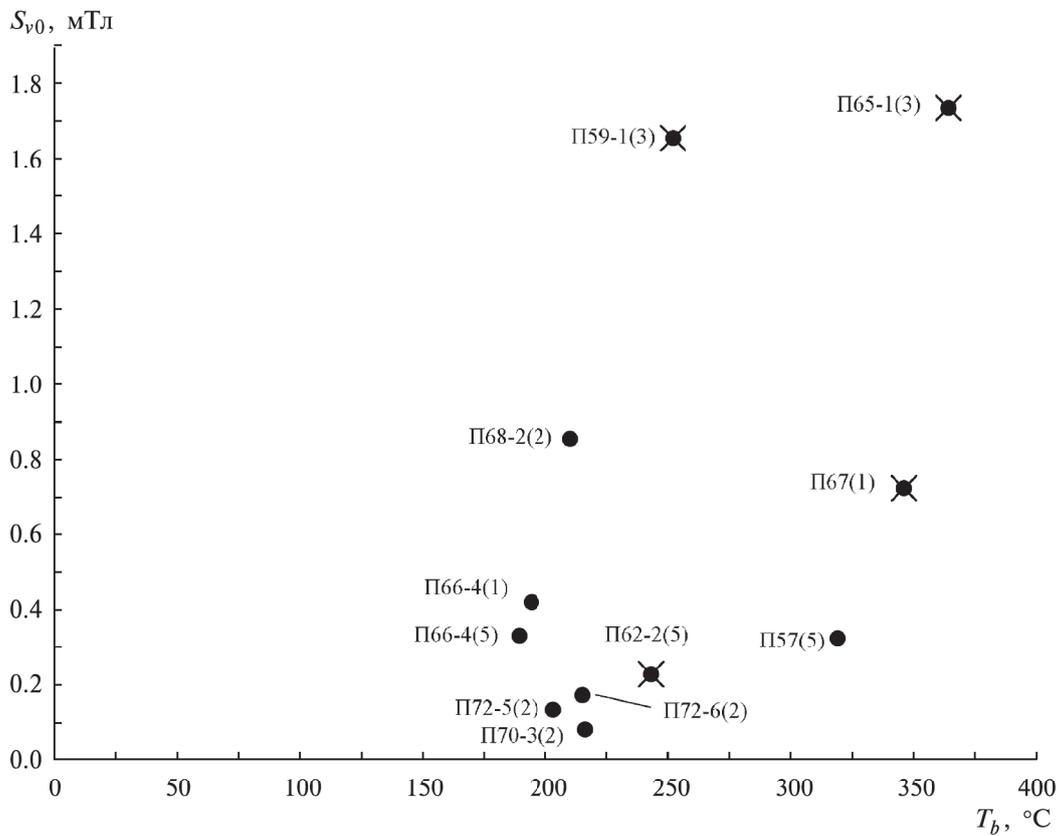


Рис. 6. Соотношение между постоянной магнитной вязкости S_{v0} и температурой блокирования T_b

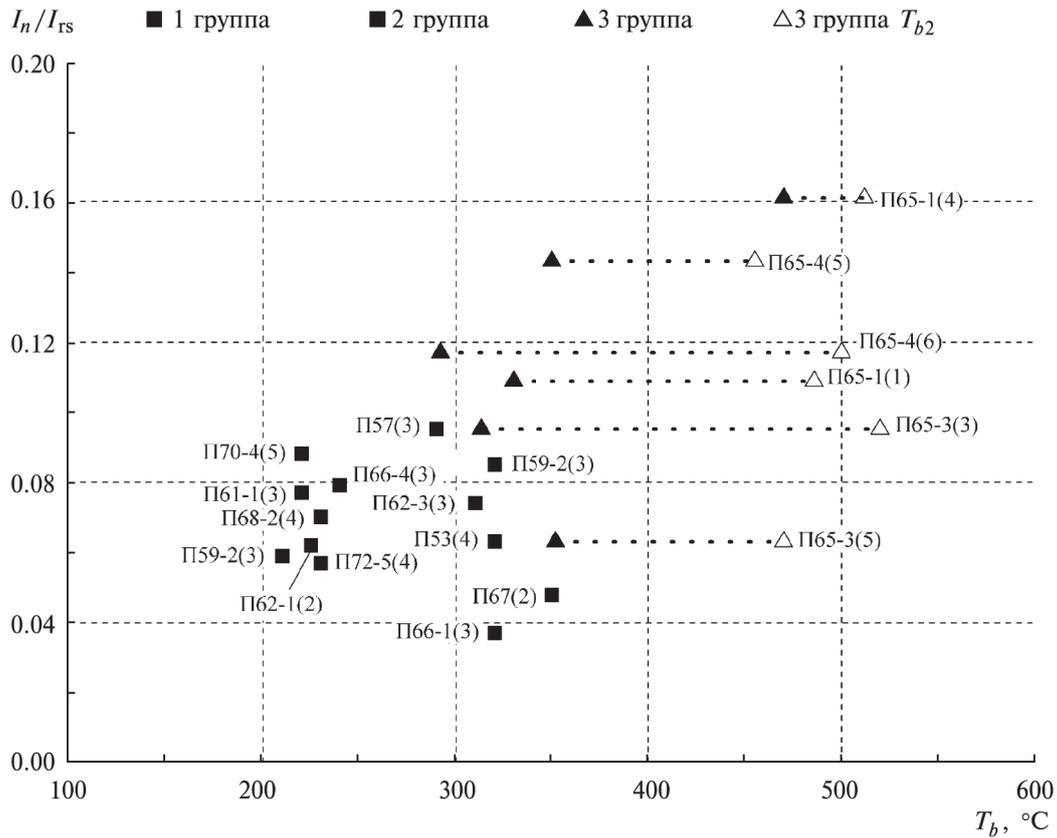


Рис. 7. Мера измененности естественной остаточной намагниченности $V_r = I_n/I_s$ образцов с различными температурами блокирования T_b . Пунктирными линиями обозначен интервал блокирующих температур образцов 3-й группы

дополнительным разрушением I_n , обусловленным более высокой скоростью однофазного окисления. На возможность этого указывалось в работе [10], где было показано, что усилению процесса окисления титаномагнетита способствуют сдвиговые напряжения.

Высокие величины V_r , а также отношения I_n/I_s на образцах П65, в которых терромагнитный анализ показал наличие двух ферромагнитных фаз, вероятно, можно объяснить тем, что базальты во время своей эволюции подверглись не только воздействию повышенного давления, но и воздействию повышенной температуры. В результате на образцах могла образоваться вторичная термоостаточная намагниченность уже на окисленной фазе. Высокие значения естественной остаточной намагниченности образцов с двухфазной ферромагнитной фракцией можно также объяснить тем, что при образовании вторичной высокотемпературной фазы, близкой к магнетиту, на ней могла образоваться вторичная химическая намагниченность, которая в сумме с частично разрушенной первичной I_{rT} низкотемпературной фазой дает высокие значения V_r и I_n/I_s (рис. 4 и 7).

Заключение

Из анализа результатов магнитных исследований следует, что у магнитных параметров базальтов

рифтовой зоны Красного моря наблюдаются широкий разброс величин и сложные соотношения между ними. Это соответствует результатам геохимических исследований, которые свидетельствуют о наличии двух этапов образования базальтов рифтовой зоны Красного моря, отличающихся различной скоростью поступления магмы и соответственно различными окислительно-восстановительными условиями.

На базальтах с небольшими величинами T_c наблюдается корреляция между магнитными и геохимическими характеристиками базальтов. Особенности магнитных свойств базальтов, образовавшихся на первом этапе (с большими T_c) и, следовательно, более древних по отношению к базальтам, образовавшимся на втором этапе, могут быть объяснены наличием в рифтовой зоне областей, где породы в процессе своей эволюции подвергались тектоническим воздействиям. Магнитными методами выявлен участок трансформного смещения, где породы испытали не только влияние повышенных давлений тектонической природы, но и вторичный разогрев и приобрели вторичную остаточную намагниченность. Вероятно, этими особенностями можно объяснить сложную структуру аномального геомагнитного поля в этом регионе.

Таким образом, формирование горных пород

в рифтовой зоне Красного моря является довольно сложным, оно характеризуется неодновременностью магмоизвержения, повышенными тектоническими напряжениями и вторичными разогревами на некоторых участках зоны, что привело к сложности и неоднородности магнитных свойств исследованных базальтов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 05-05-65053, 07-05-00783-а).

Литература

1. Шрейдер А.А., Трухин В.И., Сычев В.А., Римский-Корсаков Н.А. // *Океанология*. 1982. **XXII**, вып. 3. С. 439.
2. Альмухамедов А.И., Кашинцев Т.Л., Матвеев В.В. Эволюция базальтового вулканизма Красноморского региона. Новосибирск, 1985.
3. Трухин В.И., Сафрошкин В.Ю., Горшков А.Г. // *Физика Земли*. 1992. № 9. С. 92.
4. Трухин В.И., Максимочкин В.И., Жилева В.А. и др. // *Физика Земли*. 2006. № 11. С. 70.
5. Özdemir O. // *Phys. of the Earth and Planetary Int.* 1987. **46**. P. 184.
6. Nishitani T., Kono M. // *J. Geomag. Geoelectr.* 1989. **41**. P. 19.
7. Трухин В.И., Жилева В.А., Шрейдер А.А. // *Физика Земли*. 2002. № 8. С. 6.
8. Bezos A., Humler E. // *Geochem. Cosmochem. Acta.* 2005. **69**. N 3. P. 711.
9. Stephenson A. // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1972. N 29. P. 91.
10. Максимочкин В.И., Якупова А.М. // *Физика Земли*. 2003. № 5. С. 60.
11. Day R.J. // *Geomag. Geoelectr.* 1977. **29**. N 4. P. 233.
12. Трухин В.И., Багин В.И., Булычев А.А. и др. // *Физика Земли*. 2000. № 2. С. 68.
13. Трухин В.И., Шрейдер А.А., Багин В.И. и др. // *Физика Земли*. 2001. № 6. С. 86.
14. Трухин В.И., Шрейдер А.А., Жилева В.А. и др. // *Физика Земли*. 2005. № 3. С. 3.
15. Трухин В.И., Жилева В.А., Жилева А.И. и др. // *Физика Земли*. 2003. № 8. С. 61.
16. Трухин В.И., Максимочкин В.И., Жилева В.А. // Сб. тез. докл. Ломоносовские чтения-2007. Секция физика. МГУ, физ. ф-т. С. 173.

Поступила в редакцию
04.05.07