

## Влияние механических напряжений на остаточную намагниченность океанских базальтов

В. И. Максимочкин<sup>1,a</sup>, В. И. Трухин<sup>1,b</sup>

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,  
кафедра физики Земли. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: <sup>a</sup>maxvi@mail.ru, <sup>b</sup>dean@phys.msu.ru

Статья поступила 15.07.2009, подписана в печать 28.07.2009

Исследовано изменение остаточной намагниченности насыщения океанских базальтов при воздействии на образцы различных видов сжатия: одноосного, квазивсестороннего и всестороннего. Установлено, что характер изменений остаточной намагниченности зависит от вида сжатия и направления намагниченности в пространстве. Стабильность остаточной намагниченности растет как с ростом коэрцитивной силы ферромагнитных зерен, так и при переходе от титаномагнетита к магнетиту. Показано, что по изменению остаточной намагниченности при лабораторном сжатии образцов можно судить об испытанных горными породами *in situ* тектонических воздействиях.

*Ключевые слова:* намагниченность, ферромагнитные минералы, океанские базальты, механические напряжения, повышенные давления.

УДК: 550.38.3. PACS: 91.25.F-, 91.60.Gf.

### Введение

В рифтовых зонах и зонах трансформных разломов при формировании океанской коры горные породы подвергаются воздействию повышенных давлений. При этом возможны растяжения, сжатия и сдвиговые деформации. При напряжениях, достигающих критической величины, происходит разрушение пород и подвижки отдельных частей земной коры. В результате естественная остаточная намагниченность  $I_n$ , может существенно изменяться как за счет изменения направления спонтанной намагниченности  $I_s$  [1, 2] в отдельных частях ферромагнитных минералов, так и за счет структурных и фазовых изменений ферромагнитных зерен [3, 4]. Изменение структурного состояния ферромагнитных минералов может быть оценено по изменению коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточно-коэрцитивной силы  $H_{cr}$ , параметра  $I_{rs}/I_s$  ( $I_{rs}$  — остаточная намагниченность насыщения), изменение фазового состояния — по точке Кюри  $T_c$  и спонтанной намагниченности  $I_s$  [5]. Например, было установлено [4], что воздействие деформаций, приводящих к разрушению породы, увеличивает магнитную жесткость ( $H_c$ ,  $H_{cr}$ ) ферромагнитных зерен, а также стабильность остаточной намагниченности насыщения к воздействию квазивсестороннего сжатия. Естественная остаточная намагниченность термоостаточной природы  $I_{rT}$ , сформированная в условиях повышенного давления, обладает большей стабильностью при воздействии сжатия, чем  $I_{rT}$ , сформированная при нормальном давлении [6]. По пьезочувствительности при одноосном сжатии [7] возможна оценка величины внутренних напряжений в ферромагнитных кристаллах, которые зависят как от скорости остывания магмы, так и от испытанных породами тектонических воздействий.

Таким образом, по особенностям магнитных свойств можно судить о термодинамической предыстории горных пород, которая привела к изменению структурного и фазового состояния входящих в их состав ферромагнитных зерен. По магнитным и геохимическим

особенностям базальтов разлома Романш в работе [8] было сделано предположение, что породы, непосредственно примыкающие с юга к трансформному разлому, сформировались при воздействии тектонических напряжений.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния различных видов сжатия: одноосного, квазивсестороннего и всестороннего — на остаточную намагниченность насыщения подводных базальтов с целью оценки влияния тектонических напряжений на сохранность первичной остаточной намагниченности и уточнения термодинамических условий формирования пород в сложнопостроенных участках океанской коры.

### 1. Образцы, методика и техника эксперимента

В работе исследовались образцы подводных базальтов, поднятых аппаратом «Пайсис» в рейсе НИС «Акванавт» со дна красноморского рифта в районе  $17^{\circ}58'$  с.ш. и  $40^{\circ}04'$  в.д., а также образцы, драгированные в центральной части разлома Романш (Центральная Атлантика) в экспедиции судна «Геленджик» по двум профилям в районах приблизительно  $21^{\circ}$  и  $21^{\circ}40'$  з.д. Места отбора образцов и их магнитные характеристики подробно описаны в работах [9–11].

Измерение остаточной намагниченности в условиях повышенных давлений проводилось трехкомпонентным феррозондовым магнитометром-градиентометром Lem1-240 с максимальным разрешением по магнитному моменту  $0.1 \text{ мкА} \cdot \text{м}^2$ , сконструированным авторами и изготовленным в Институте космических исследований РАН Украины.

Измерения проводились на образцах в виде цилиндра диаметром 7–8 мм и высотой 8–10 мм, которые помещались в камеру высокого давления типа цилиндр–поршень. В качестве передающей давление среды для создания всестороннего сжатия использовалось трансформаторное масло, для создания квазивсестороннего сжатия — пиромиллит. Камера высокого давления помещалась внутрь блока феррозондовых датчиков,

которые находились в кольцах Гельмгольца и закрывались при измерении намагниченности двухслойным экраном из пермаллоя. Усилие создавалось немагнитным прессом  $F_{\max} = 200$  кН. При одноосном сжатии образец зажимался между наковальнями пресса через цилиндрические подставки. При нормальных условиях остаточная намагниченность образцов измерялась ротационным магнитометром JR-6, намагниченность насыщения  $I_s$  — с помощью микроверберметра по методу Вейса и Форрера,  $H_c$ ,  $H_{cr}$  и блокирующая температура  $T_b$  определялись на вибрационном термомагнитометре ВМА-1 [12].

Термомагнитными [10], петрохимическими [11], а также электронно-зондовыми исследованиями было установлено, что магнитные свойства большей части исследованных образцов базальтов Красного моря определяются зернами титаномагнетита с содержанием ульвошпинели  $x = 0.424 \div 0.554$  с признаками однофазного окисления, на что указывают величины температур блокирования  $T_b$  образцов, которые изменялись от 208 до 468 °С. На некоторых образцах были обнаружены признаки гетерофазного окисления, они имели  $T_b = 467-554$  °С при содержании ульвошпинели  $x = 0.34-0.43$  (см. табл. 1-3). Величины отношений  $I_{rs}/I_s = 0.15 \div 0.34$ ,  $H_{cr}/H_c = 1.17 \div 1.68$  указывают на то, что ферримагнитные зерна исследованных образцов базальтов находятся в псевдооднородном и однодородном состояниях [13]. Рудные минералы базальтов Красного моря имеют дендритовую структуру зерен размером до 5 мкм.

Таблица 1

**Магнитные характеристики исследованных образцов базальтов рифтовой зоны Красного моря при квазивсестороннем сжатии**

№ образца	$I_{rs}/I_s$	$H_c$ , мТл	$H_{cr}$ , мТл	$T_b$ , °С	$\beta_1^{полн}$ , ГПа <sup>-1</sup>	$\beta_1^{необр}$ , ГПа <sup>-1</sup>	$\beta_1^{обр}$ , ГПа <sup>-1</sup>
П72-3, $P_{атм}$ 0.98 ГПа 1.45 ГПа 2.02 ГПа	0.15	9.5	14.4	360	8.3	3.4	0.8
			17.1		3.7	1.3	0.8
			41.1		0.7	0.5	0.2
			44.7		0.7	0.5	0.1
П72-5-0	0.21	12.7	17.5	208-272	5.6	1.8	2
П53-4(3)	0.20	14.2	19.1	223	3.86	1.56	
П70-4(6)	0.18	15.1	19.9	318	3,2	1.11	
П70-4(5)	0.21	15.2	22.1	260	4.63	1.45	
П53-2(5)	0.18	15.7	25	278	3.15	1,31	
П66-4-0	0.32	23.2	27.5	330	4	0.8	2.2
П62-1(5)	0.24	23.7	31	274	3.93	1.04	
П67-0	0.26	36.5	46.1	270-426	1.8	0.6	0.9
П65-3-0	0.27	36.5	48.6	478	1.8	0.8	0.97
П66-1(4)	0.22	57	71.2	367	2.19	0.57	

Коэффициенты  $\beta_1$  рассчитаны по изменениям намагниченности при квазивсестороннем сжатии.

В состав базальтов разлома Романш входили многодоменные или псевдооднородные ферримагнитные зерна ( $I_{rs}/I_s = 0.04 \div 0.1$ ,  $H_{cr}/H_c = 1.34 \div 3.61$ ) в основном изометричной формы [13]. Высокие величины блокирующих температур  $T_{b\max} = (442-595)$  °С свидетельствуют о наличии гетерофазного окисления титаномагнетитовых зерен, входящих в состав этих базальтов.

**2. Результаты экспериментов**

Эксперименты по воздействию различных видов сжатия проводились при циклическом наложении и снятии повышенного давления. Наиболее характерные кривые изменения остаточной намагниченности насыщения  $I_{rs}$ , при росте и снятии повышенного давления приведены на рис. 1. При всех видах сжатия и ориентациях намагниченности в пространстве в целом с ростом давления наблюдается уменьшение остаточной намагниченности. При снятии давления в циклах в случаях всестороннего, а также одноосного и квазивсестороннего сжатия при  $I_{rs} \parallel P$  наблюдалось частичное восстановление намагниченности, т. е. остаточная намагниченность после снятия давления оказывалась больше, чем  $I_{rs}$ , измеренная под давлением. В случае  $I_{rs} \perp P$  как при одноосном, так и при квазивсестороннем (рис. 1, б) сжатии при снятии давления намагниченность продолжала уменьшаться, а при последующем увеличении давления в циклах наблюдался некоторый рост  $I_{rs}(P)$ . В целом остаточная намагниченность, измеренная под давлением в цикле в этом случае, оказывалась больше, чем после снятия давления.

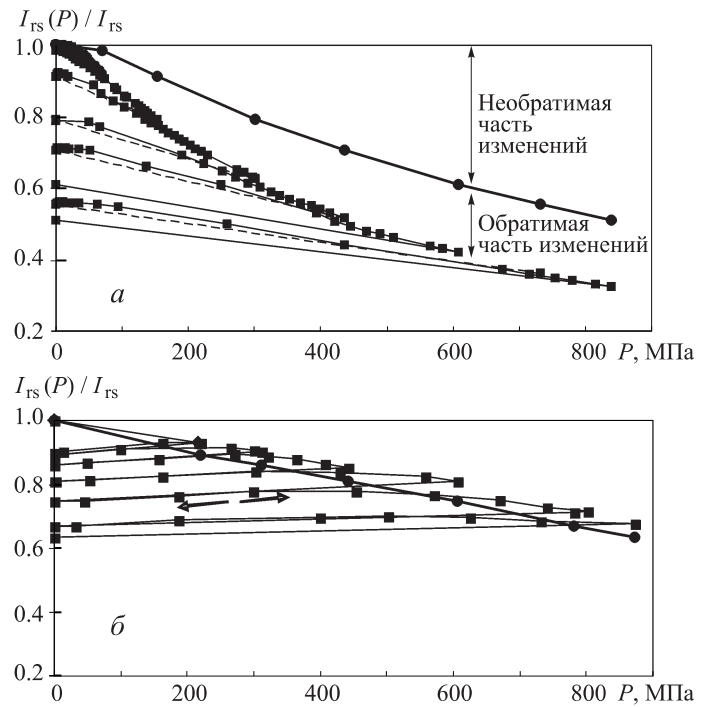


Рис. 1. Изменение остаточной намагниченности насыщения ( $I_{rs}$ ) образца П70-2 базальта Красного моря при наложении и снятии квазивсестороннего сжатия: а —  $I_{rs} \parallel P$ , б —  $I_{rs} \perp P$ ; ■ — полные изменения, ● — необратимая часть изменений

Полные изменения остаточной намагниченности при воздействии повышенного давления можно представить в виде необратимой и обратимой частей (см. рис. 1). Величины полных изменений остаточной намагниченности, измеренной под давлением, для напряжений различного характера существенно различаются. На всех исследованных образцах наибольшие изменения  $I_{rs}$  наблюдались при воздействии на образцы одноосного сжатия и при  $I_{rs} \parallel P$ , наименьшие изменения — при квазивсестороннем сжатии и при  $I_{rs} \perp P$  (рис. 2).

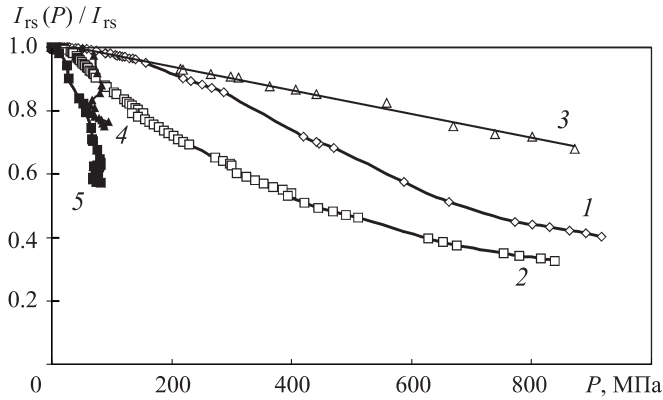


Рис. 2. Изменение остаточной намагниченности насыщения ( $I_{rs}$ ) образца П70-2 базальта Красного моря с ростом давления при различных видах сжатия и ориентациях намагниченности в пространстве: 1 — всестороннее сжатие; 2 — квазивсестороннее,  $I_{rs} \parallel P$ ; 3 — квазивсестороннее,  $I_{rs} \perp P$ ; 4 — одноосное,  $I_{rs} \parallel P$ ; 5 — одноосное,  $I_{rs} \perp P$

Было установлено, что вклад необратимых изменений в полные изменения намагниченности зависит от магнитной жесткости ферромагнитных зерен, ориентации намагниченности в пространстве и увеличивается с ростом давления. При квазивсестороннем сжатии и  $I_{rs} \perp P$  остаточная намагниченность насыщения образцов с  $H_c \leq 9.5$  мТл с ростом давления изменяется практически необратимо. На образцах с  $H_c \geq 13.1$  мТл появляются обратимые изменения  $I_{rs}(P)$ . Величина обратимых изменений растет с увеличением давления примерно до 200–300 МПа, далее  $\Delta I_{rs}^{обp}(P)$  практически не зависит от давления. При давлениях  $>350$  МПа преобладало необратимое разрушение намагниченности. Вклад обратимых изменений в полные изменения остаточной намагниченности увеличивается с ростом коэрцитивной силы. Если на образцах с  $H_c < 9.5$  мТл изменения  $I_{rs}(P)$  практически необратимы, то на образцах с  $H_c = 23.5$  мТл, отношение  $\Delta I_{rs}^{обp} / \Delta I_{rs}^{полн}$  достигало 58%. Коэффициент пьезочувствительности, рассчитанный по линейной аппроксимации обратимых изменений намагниченности  $I_{rs}(P)$  при малых давлениях ( $P < 200$  МПа) составил  $\beta^{обp \perp} = \Delta I_{rs}^{обp} / (I_{rs0} \cdot \Delta P) = -0.36$  ГПа<sup>-1</sup>, где  $I_{rs0}$  — начальная величина остаточной намагниченности насыщения при  $P = P_{атм}$ .

При квазивсестороннем сжатии и  $I_{rs} \parallel P$  остаточная намагниченность, измеренная после снятия давления в цикле, всегда была больше намагниченности, измеренной под давлением. В этом случае, так же как и при  $I_{rs} \perp P$ , на всех исследованных образцах при малых давлениях  $P < 200$  МПа обратимые изменения  $I_{rs}(P)$  преобладают над необратимыми. С ростом давления вклад необратимых изменений намагниченности в полные изменения  $I_{rs}$  также растет (рис. 3). Если на образцах с  $H_c = (9.5-13.1)$  мТл  $\Delta I_{rs}^{обp} \approx \Delta I_{rs}^{необp}$  при  $P = 210-220$  МПа, то на образцах с  $H_c = 23.5$  мТл это равенство выполняется только при достижении  $P = 650-700$  МПа. Для образцов базальта № П65-4 с  $H_c = 27.8$  мТл, которые отобраны из зоны нетрансформного смещения и которые, согласно [10, 11], испытывали в естественных условиях воздействие текто-

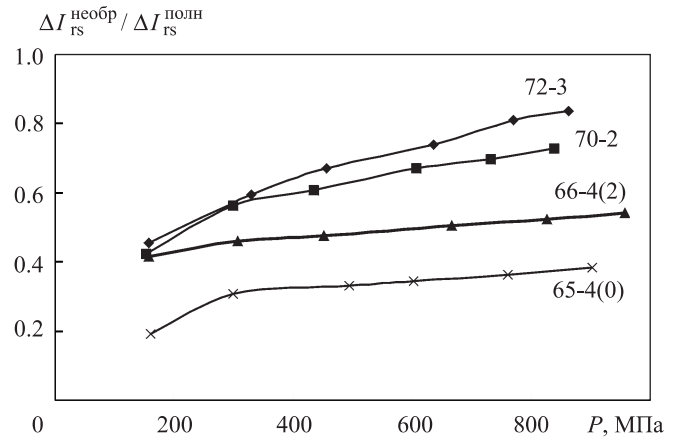


Рис. 3. Вклад необратимых изменений в полные изменения остаточной намагниченности насыщения при воздействии на образцы базальтов Красного моря квазивсестороннего сжатия (цифры около точек — номера образцов, см. табл. 1)

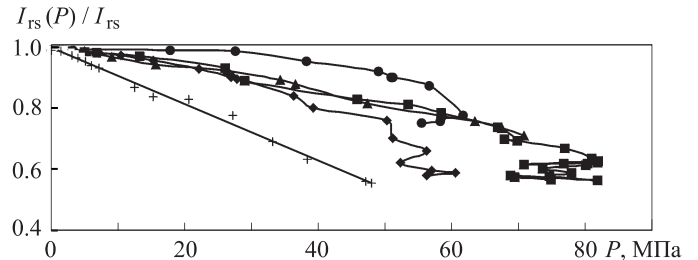


Рис. 4. Изменение остаточной намагниченности насыщения образцов базальтов Красного моря (■ — № 70-2, ▲ — № 70-4) и разлома Романш (◆ — № 42, ● — № 42-17, + — № 34-4) при наложении одноосного сжатия ( $I_{rs} \parallel P$ )

нических напряжений, обратимые изменения  $I_{rs}(P)$  при квазивсестороннем сжатии преобладают над необратимыми во всем интервале давлений от  $P_{атм}$  до 900 МПа, т. е.  $\Delta I_{rs}^{необp} < 0.5 \Delta I_{rs}^{полн}$  (рис. 3).

В случае всестороннего сжатия необратимые изменения остаточной намагниченности насыщения преобладают во всем диапазоне испытанных давлений  $P = (P_{атм} - 900)$  МПа. Для образцов с  $H_c = (9.5-13.1)$  мТл соотношение между обратимой и необратимой частями изменения  $I_{rs}$  практически не зависит от величины давления ( $\Delta I_{rs}^{необp} / \Delta I_{rs}^{полн} = 0.68-0.7$ ). На образцах с  $H_c = 23.5$  мТл наблюдалось небольшое уменьшение вклада необратимой части в полные изменения намагниченности с 0.88 до 0.76 при росте давления с  $P = 190$  до 973 МПа.

При квазивсестороннем сжатии и  $I_{rs} \parallel P$  полные изменения остаточной намагниченности в большинстве случаев достаточно хорошо описывались гиперболической функцией вида  $I_{rs}(P) = I_{rs0} / (1 + \beta P)$ , где  $\beta$  — пьезочувствительность (коэффициент, характеризующий скорость изменения намагниченности). При всестороннем сжатии изменения  $I_{rs}(P)$  имеют более сложную зависимость (рис. 2), однако при больших давлениях полные изменения также можно было аппроксимировать гиперболической функцией, при этом изменения остаточной намагниченности насыщения при

давлениях, стремящихся к 1000 МПа, приближаются к величине изменений  $I_{rs}$  при квазивсестороннем сжатии. Обратимая часть изменений  $I_{rs}(P)$  при квазивсестороннем и всестороннем сжатиях в области малых давлений лучше описывалась линейной функцией.

При одноосном сжатии как полные изменения  $I_{rs}(P)$ , так и обратимая ее часть при  $P < 50$  МПа изменялись практически линейно (рис. 4). При достижении определенного давления наблюдалось растрескивание образца, при этом происходило разрушение остаточной намагниченности, сравнимое с изменением  $I_{rs}$  в упругой области.

### 3. Обсуждение полученных результатов

Ранее в работе [4] нами было показано, что стабильность  $I_{rs}$  базальтов Красного моря к воздействию квазивсестороннего сжатия растет, а пьезочувствительность ( $\beta_1$ ) падает с ростом магнитной жесткости (остаточно-коэрцитивной силы от 14.4 до 44.7 мТл) зерен. В случае всестороннего сжатия (см. табл. 2) наблюдается в целом такая же закономерность, при этом стабильность  $I_{rs}$  к воздействию всестороннего сжатия при  $P = 700$  МПа на 15–20% выше, чем в случае квазивсестороннего сжатия. В обоих случаях наблюдался значительный разброс данных относительно кривых аппроксимации зависимости  $I_{rs}(P = 700 \text{ МПа}) = f(H_{cr})$ , который, вероятно, обусловлен различиями в фазовом составе ферромагнитных зерен. Действительно, как было показано выше, температуры блокирования, оцененные по  $I_{rs}(T)$ , обнаруживают значительный разброс величин. Если учитывать данные  $\beta_1$ -образцов, имеющих близкие величины  $T_b = 254\text{--}283^\circ\text{C}$ , то уменьшение пьезочувствительности (рост стабильности) с ростом остаточной коэрцитивной силы образцов становится более явным (см. табл. 1).

Зависимость пьезочувствительности от фазового состава и точки Кюри  $T_c$  подтверждается результатами исследований образца базальта № П71-3, который подвергался отжигу при повышенных температурах в атмосфере воздуха. Как видно из рис. 5, после нагрева до  $T = 400^\circ\text{C}$  на кривых  $I_{rs}(T)$  отмечается появление высокотемпературной фазы, имеющей температуру блокирования, близкую к  $T_c$  магнетита. Эта фаза достаточно хорошо идентифицируется по кривой  $I_{rs}(T)$  после отжига образца при  $T = 650^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Из табл. 2 видно, что величина коэффициентов пьезочувствительности при этом уменьшается:  $\beta_3^{\text{полн}}$  — с 1.4 до 0.4 ГПа<sup>-1</sup>, а  $\beta_3^{\text{обп}}$  — с 0.8 до 0.2 ГПа<sup>-1</sup> при увеличении коэрцитивной силы всего на 12%.

Зависимость пьезочувствительности от фазового состава может быть обусловлена изменением вклада магнитоупругой энергии

$$E_{\lambda\sigma} = -\frac{3}{2}\lambda_{100}\sigma [\alpha_1^2\gamma_1^2 + \alpha_2^2\gamma_2^2 + \alpha_3^2\gamma_3^2] - 3\lambda_{111}\sigma [\alpha_1\alpha_2\gamma_1\gamma_2 + \alpha_1\alpha_3\gamma_1\gamma_3 + \alpha_2\alpha_3\gamma_2\gamma_3]$$

в свободную энергию кристалла (здесь  $\alpha_i$  — направляющие косинусы спонтанной намагниченности  $I_s$  относительно осей кристалла,  $\gamma_i$  — направляющие косинусы  $\sigma$  относительно осей кристалла). Согласно [14], константы магнитоупругости ( $\lambda_{111}$ ,  $\lambda_{100}$ )

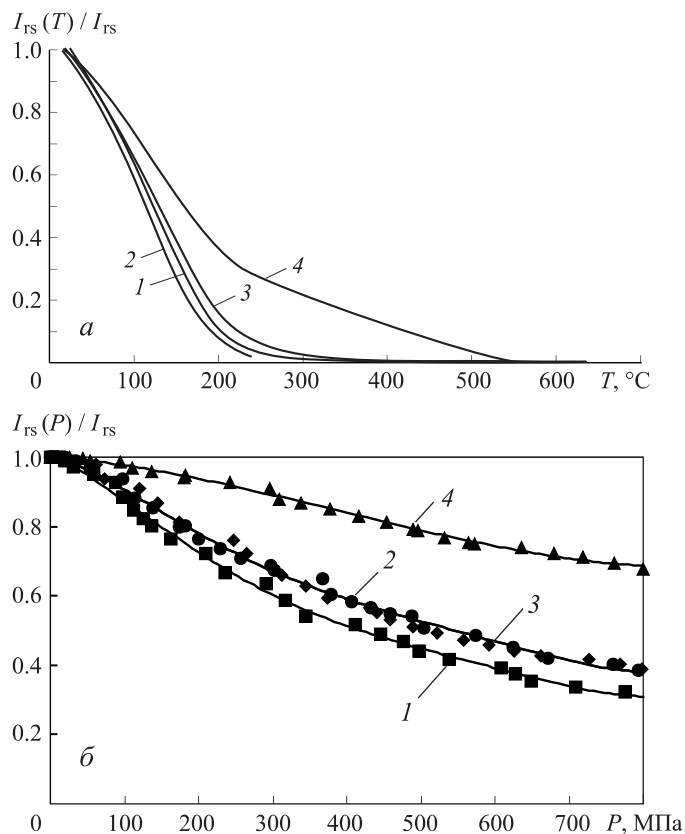


Рис. 5. Изменение остаточной намагниченности насыщения образца базальта Красного моря (№ 71-3): а — при нагреве, б — при наложении всестороннего сжатия; 1 — из исходного состояния, 2 — после нагрева до 400°С, 3 — после нагрева до 500°С, 4 — после нагрева до 650°С с выдержкой в течение 30 мин

и точка Кюри зависят от содержания титана (Ti) в титаномагнетите ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ). Вследствие этого следует ожидать различия эффекта воздействия сжатия на остаточную намагниченность базальтов, содержащих титаномагнетитовые зерна с разной концентрацией титана. Действительно, было показано [7], что для океанских базальтов с титаномагнетитами  $x = (0.5\text{--}0.58)\beta_3^{\text{обп}} = (2.21\text{--}4.58) \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ , а для долеритов с магнетитом  $\beta_3^{\text{обп}} = (0.65\text{--}0.68) \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ . Теоретические расчеты [15] в целом подтверждают эту закономерность: пьезочувствительность обратимых изменений  $I_{rs}$  ансамбля однодоменных зерен титаномагнетита с  $x = 0.56$  вытянутой формы ( $\beta_3^{\text{обп}} = 4.2 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ ) меньше, чем для сферических зерен ( $\beta_3^{\text{обп}} = 21 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ ), а также для магнетита ( $x = 0$ )  $\beta_3^{\text{обп}} = (0.1\text{--}2.4) \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ . Наши эксперименты показали, что на базальтах Красного моря с  $T_b = 285^\circ\text{C}$ , содержащих титаномагнетитовые ( $x = 0.42\text{--}0.5$ ) зерна, близкие к однодоменным ( $I_{rs}/I_s = 0.15\text{--}0.22$ ), пьезочувствительность обратимых изменений при одноосном сжатии  $\beta_3^{\text{обп}} = (1.56\text{--}1.75) \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$  оказалась несколько ниже, чем экспериментальные данные [7]. Электронно-зондовые исследования показали, что титаномагнетиты базальтов Красного моря имеют дендритовую

Таблица 2

**Магнитные характеристики исследованных образцов базальтов рифтовой зоны Красного моря при всестороннем и одноосном сжатии**

№ образца	$I_{rs}/I_s$	$H_c$ , мТл	$H_{cr}$ , мТл	$T_b$ , °С	$\beta_2^{полн}$ , ГПа <sup>-1</sup>	$\beta_2^{необр}$ , ГПа <sup>-1</sup>	$\beta_3^{полн}$ , ГПа <sup>-1</sup>	$\beta_3^{обр  }$ , ГПа <sup>-1</sup>	$\beta_3^{обр\perp}$ , ГПа <sup>-1</sup>
П72-8(3).1	0.19	10.6	15.4	280	1.89	1.04			
П72-8(3).2	0.17	11.3	16.2	305	2.71	1.19			
П70-2	0.17	13.1	18.2	284	1.05	0.64	3.4	1.56	-0.36
П70-4		13.8	19.9	283	0.9	0.52	3.0	1.75	
П66-4(4)2	0.13	19.1	24.3	242-468	0.93	0.41			
П66-4(4)1	0.26	25.8	36.6	554	0.67	0.38			
П65-4(0)	0.34	27.8	41.0	463	0.42	0.18			
П71-3	исходное состояние	0.17		254			1.4		
	после $T = 340^\circ\text{C}$	0.15	11.9	16.2	265		1.4	0.8	
	400°С	0.11	10.5	16.4	272		1.8	1.2	
	500°С	0.1	8.3	14.5	339		1.5	0.8	
	600°С	0.11	10.7	18.3	405		1.4	0.8	
	650°С, $t = 30'$	0.16	13.3	21.1	230, 545		0.4	0.2	

Коэффициенты  $\beta_2$  рассчитаны по изменениям намагниченности при всестороннем сжатии,  $\beta_3$  — при одноосном сжатии.

Таблица 3

**Магнитные характеристики исследованных образцов базальтов из разлома Романш при всестороннем и одноосном сжатии**

№ образца	$I_{rs}/I_s$	$H_c$ , мТл	$H_{cr}$ , мТл	$T_b$ , °С	$\beta_2^{обр}$ , ГПа <sup>-1</sup>	$\beta_3^{полн}$ , ГПа <sup>-1</sup>	$\beta_3^{обр}$ , ГПа <sup>-1</sup>
42-17		2.3	8.3	442	1.7		
42		7.2	12.2	555	3.1	4.0	1.45
34-4	0.09	17.5	27.1	499	1.88	9.1	5.8
34-7	0.19	21.4	28.7	481	1.46		
30-3	0.11	21.8	40.7	595	0.12		
43-40		23.5	46.7	582	0.26		
31-1	0.10	25.1	44.8	547	0.39		

Коэффициенты  $\beta_2$  рассчитаны по изменениям намагниченности при всестороннем сжатии,  $\beta_3$  — при одноосном сжатии.

структуру зерен, поэтому меньшая пьезочувствительность, вероятно, обусловлена, согласно теоретическим оценкам [15], преобладанием анизотропии формы над кристаллографической анизотропией. Возможно, большую стабильность  $I_{rs}$  (меньшую пьезочувствительность) можно объяснить также тем, что некоторые базальты испытали *in situ* воздействие тектонических напряжений. Действительно, образцы базальтов разлома Романш, испытывавших, согласно [8], воздействие тектонических напряжений, имели меньшую величину  $\beta_3^{обр} = 1.45 \cdot 10^{-9}$  (образец № 42), чем базальты из зоны трансенсии —  $\beta_3^{обр} = 5.8 \cdot 10^{-9}$  (образец № 34) (табл. 3). То же самое относится к базальтам Красного моря (образец № П65), отобранным из зоны нетрансформного смещения [10]. Они имели на 30–50% меньшие величины пьезочувствительности (см. табл. 2), а также меньший вклад необратимых изменений в полные изменения намагниченности  $I_{rs}$  (см. рис. 3) при воздействии квазивсестороннего сжатия по сравнению с образцами из других зон, имеющих одинаковую магнитную жесткость. Эти предположения подтверждаются также результатами лабораторных исследований,

которые показали, что после воздействия сжатия образцов базальта П72-3 (см. табл. 1) в пределах давлений  $P = 1.45-2.02$  ГПа, которые приводили к разрушению образца, пьезочувствительность  $I_{rs}$  уменьшается примерно в 4–8 раз.

**Заключение**

На основе анализа результатов лабораторных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Величина и характер изменения остаточной намагниченности насыщения океанских базальтов при механических воздействиях зависит от вида сжатия и направления намагниченности. Наибольшие изменения  $I_{rs}(P)$  происходят при одноосном сжатии и  $I_{rs} \parallel P$ , при всестороннем сжатии минимальны необратимые изменения  $I_{rs}$ , при одноосном сжатии и  $I_{rs} \perp P$  минимальны полные изменения.

2. При одноосном сжатии скорость разрушения остаточной намагниченности резко увеличивается при приближении к пределу упругости.

3. Стабильность  $I_{rs}$  базальтов при воздействии повышенного давления растет при переходе от титаномагнетита к магнетиту.

4. Породы, испытывавшие воздействие повышенных давлений в области хрупкого разрушения, обладают большей стабильностью  $I_{rs}$  к воздействию сжатия. По величине изменений остаточной намагниченности насыщения при лабораторном воздействии повышенного давления можно судить об испытанных горными породами *in situ* тектонических воздействиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 07-05-00783).

**Список литературы**

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М., 1971.
2. Такадзуми С. Физика ферромагнетизма. Т. 2. Магнитные характеристики и их практическое применение. М., 1987.

3. Трухин В.И., Максимочкин В.И., Жилыева В.А., Шрейдер А.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 5. С. 46.
4. Максимочкин В.И., Трухин В.И., Гофман А.В., Шебунин Е.И. // Физические проблемы экологии (Экологическая физика): Сб. науч. трудов. М., 2008. № 15. С. 205.
5. Трухин В.И., Гаранин В.К., Жилыева В.А., Кудрявцева Г.П. Ферромагнетизм минералов. М., 1983.
6. Максимочкин В.И. // Физика Земли. 1995. № 9. С. 49.
7. Hodych J.P., Mazka J. // Geophys. J. Int. 2004. **157**. P. 1017.
8. Кашиинцев Г.Л., Шрейдер А.А., Максимочкин В.И. и др. // Геотектоника. 2008. № 4. С. 85.
9. Трухин В.И., Шрейдер А.А., Жилыева В.А. и др. // Физика Земли. 2005. № 3. С. 3.
10. Трухин В.И., Максимочкин В.И. и др. // Физика Земли. 2006. № 11. С. 70.
11. Трухин В.И., Максимочкин В.И. // Физические проблемы экологии (Экологическая физика): Сб. науч. трудов. М., 2007. № 14. С. 371.
12. Максимочкин В.И., Трухин В.И., Гарифуллин Н.М., Хасанов Н.А. // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 5. С. 1.
13. Day R., Fuller M., Schmidt V. // Phys. Earth Planet. Int. 1977. N 14. P. 260.
14. Syono Y. // Phys. Earth Planet. Int. 1965. N 4. P. 71.
15. Афремов Л.Л., Панов А.В. // Физика Земли. 2009. № 1. С. 67.

### Influence of mechanical stresses on remnant magnetisation of ocean basalts

V. I. Maksimochkin<sup>1,a</sup>, V. I. Trukhin<sup>1,b</sup>

*Department of Physics of the Earth, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>maxvi@mail.ru, <sup>b</sup>dean@phys.msu.ru*

Change of remanent magnetization of saturation of ocean basalts at influence on the different types of mechanical stresses: uniaxial, hydrostatic and quasihydrostatic was investigated. It was established that the character of changes of remnant magnetization depend on the type of compression and the magnetization orientation in space. The stability of remnant magnetization grows with growth of coercive force of ferrimagnetic grains and at transition from titanomagnetite to magnetite. It is shown that on change of remnant magnetization at laboratory mechanical stresses one can treat about the tested by rocks in situ tectonic influences.

*Keywords:* magnetization, ferrimagnetic minerals, ocean basalts, mechanical stress, elevated pressures.

*PACS:* 91.25.F, 91.60.Gf.

*Received 15 July 2009.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2009).

#### Сведения об авторах

1. Максимочкин Валерий Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор; e-mail: maxvi@phys.msu.ru.
2. Трухин Владимир Ильич — докт. физ.-мат. наук, профессор, декан факультета; e-mail: dean@phys.msu.ru.