ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2000, № 7, с. 43-48

УДК 550.382.3

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ВЯЗКОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ БАЗАЛЬТОВ

© 2000 **г. В. И. Максимочкин**

Башкирский государственный университет, г. Уфа

Поступила в редакцию 17.03.98 г.

В работе исследовалось влияние длительности воздействия давления на формирование пьезовязкой остаточной намагниченности в базальтах. Установлено, что величина пьезовязкой остаточной намагниченности при P=160 МПа выше вязкой остаточной намагниченности в 1.8-7.3 раза. Влияние давления на процесс пьезовязкого намагничивания в базальтах при степени однофазного окисления титаномагнетита Z = 0.4-0.75 в 2—4 раза превышает аналогичное влияние на неокисленных титаномагнетитах либо претерпевших высокотемпературное гетерогенное окисление.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование намагниченности ферримагнетиков, входящих в состав горных пород в естественных условиях, отличается от закономерностей формирования намагниченности искусственных материалов. Действительно, намагниченность горных пород большей части земной коры сформировалась в результате длительного воздействия довольно слабого геомагнитного поля в условиях повышенных давлений и температуры, которые могли в течение геологического времени также изменяться.

Из физики ферромагнетизма и магнетизма горных пород известно [Вонсовский, 1971; Трухин, 1973; Тикадзуми, 1987], что намагниченность с течением времени может изменяться за счет процессов так называемого магнитного последействия. Наиболее существенным для магнетизма горных пород проявлением магнитного последействия является образование вязкой остаточной намагниченности (I_{rV}). Большая часть естественной остаточной намагниченности (I_n) горных пород, особенно континентальной коры, может быть вязкой природы [Безуглая и др., 1973]. Вследствие этого, для расшифровки компонентного состава естественной остаточной намагниченности, для повышения надежности интерпретации аномального геомагнитного поля районов с тектонической активностью, для исследования закономерностей формирования земной коры методами геомагнетизма важное значение имеют исследования влияния давления и температуры на процессы вязкого намагничивания горных пород.

Из литературы [Трухин, 1973; Безуглая и др., 1973; Нагапетян, 1987] известно, что и температура и давление могут оказывать существенное влияние на формирование вязкой намагниченности. Установлено, что в присутствии как одноосного, так и квазивсестороннего сжатия, образование вязкой остаточной намагниченности в образце происходит более интенсивно, чем в случае ненапряженного состояния [Безуглая и др., 1973]. Чем больше давление, тем больше величина вязкой остаточной намагниченности, образованной за один и тот же промежуток времени. Вязкая остаточная намагниченность, образованная при больших давлениях, более стабильна к внешним воздействиям, чем I_{rV}, образованная без избыточного давления [Трухин, 1973; Безуглая и др., 1973],

Исследования влияния давления на процессы вязкого намагничивания, как следует из литературы, проводились как непосредственно при воздействии давления (Р), так и после этого воздействия. Эти исследования проводились в основном до давлений в 80-100 МПа. Действию таких давлений будут подвергаться породы на глубинах 3—3.5 км, если учитывать только действие вышележащих пород. В тектоноактивных зонах земной коры породы периодически подвергаются изменяющимся давлениям, что при действии геомагнитного поля будет приводить к образованию пьезоостаточной намагниченности (I_{rP}) в этих породах. На фоне этой намагниченности *с* течением времени может образовываться вязкая остаточная намагниченность. Закономерности роста вязкой намагниченности при таких воздействиях изучены не были.

Проведение подобных исследований важно также с методической точки зрения при изучении остаточной намагниченности пород, поднятых из скважин, так как при бурении и извлечении керна, т.е. при снятии давления, на фоне вязкой остаточной намагниченности, образованной в естественных условиях при квазивсестороннем сжатии, может образовываться пьезоостаточная намагниченность.

В связи с вышеизложенным, в данной работе изучалось влияние квазивсестороннего давления на процессы вязкого намагничивания базальтов на фоне пьезонамагничивания с целью выявле-

ния закономерностей формирования естественной остаточной намагниченности горных пород глубоких горизонтов земной коры, глубже 3.5 км, а также пород тектоноактивных районов.

ОБРАЗЦЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО И ТЕРМОМАГНИТНОГО АНАЛИЗОВ

Исследования проводились на образцах океанских базальтов, в качестве которых были использованы базальты горы Ампер (№ 684а, 684б, 681, 731, 740), отобранных в 1-м рейсе НИС "Витязь", а также на искусственных титаномагнетитах. Результаты химического и фазового минералогического анализа показали, что ферримагнитная фракция образцов базальтов г. Ампер представлена титанистыми фазами со структурой типа шпинели (титаномагнетит, титаномаггемит) с содержанием TiO_2 от 12.77 до 19.2 вес. % (табл. 1). Количество примесей MgO колебалось от 1.38 до 6.5 вес. % Al_2O_3 – от 4.27 до 9.43 вес. %. Максимальное содержание элементов примесей MnO и Cr_2O_3 составляло 0.64 вес. % и 0.31 вес. % соответственно. Состав ферримагнитной фракции базальтов г. Ампер достаточно однороден. Магнитные зерна образцов № 684 в основном изометричны с размерами от 40 до 60 мкм. Были обнаружены также зерна вытянутой формы с пониженным содержанием TiO_2 – до 0.98 вес. %. Магнитные зерна образцов № 740 несколько меньше, чем у образцов № 684а, 684б, 681, и имели размеры примерно в (10–20) мкм. Кроме ферримагнитных зерен со структурой шпинели, в образцах № 740 были обнаружены зерна рутила с 4.3 вес. % FeO. Зерна ферримагнитной фракции базальтов г. Ампер выглядят чистыми, без структур распада твердого раствора. Наши данные согласуются с данными анализов, полученными на аналогичных образцах А.К. Гапеевым [Городницкий и Назарова, 1984].

Синтезированные образцы по данным 8 анализов, проведенных А.Н. Кониловым, были представлены титаномагнетитовой фазой с содержанием TiO_2 от 14.28 до 18.43 вес. %, FeO – (69.04–80.58) вес. %, с очень незначительным содержанием примесей Al_2O_3 – от 0.01 до 0.43 вес. % и K_2O – от 0.01 до 0.07 вес. %, а также ильменитовой фазой с содержанием TiO_2 от 43.03 до 47.67 вес. % и FeO – от 46.49 до 51.74 вес. %. Параметр решетки титаномагнетитовой фазы составлял $d = 0.8471$ нм (среднее из 8 анализов), ильменитовой фазы – $d_{113} = 0.22394$, $d_{116} = 1.7228$, $d_{300} = 0.14684$ нм (табл. 2).

Термомагнитный фазовый анализ показал (см. рис. 1 и 2), что магнитная фракция образцов № 731, 684а, 684в, 681 довольно нестабильна к нагревам. Действительно, кривые зависимости намагниченности насыщения от температуры – $I_s(T)$ при охлаждении этих образцов после прогрева их до 600°С идут значительно выше кривых $I_s(T)$ при нагреве. Такое поведение $I_s(T)$ характерно для однофазно окисленного титаномагнетита, который при нагреве распадается на магнетит и Ti-обогащенную фазу [Ozima and Larson, 1970; Трухин и Максимочкин, 1982]. Обработка кривых по специальной методике [Иванов и др., 1992] показала, что на спектральных кривых (DTF) образцов № 740, 731, 681 наблюдался один значительный максимум (рис. 2), который идентифицировался

Таблица 1. Результаты локального рентгеноспектрального анализа ферритов – окислов образцов базальтов горы Ампер

		Химический состав, вес. %									
№ обр.	№ ан.	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Cr_2O_3	MnO	FeO	MgO	CaO	др. эл.	Σ
684в	1	1.54	5.73	15.32	0.04	0.39	61.24	5.51	0.39	0.55	90.7
	2	0.45	5.12	15.59	0.05	0.34	64.45	6.5	0.15	0.42	93.1
	3	1.09	5.09	15.43	0.17	0.33	61.63	5.62	0.15	0.27	89.8
684а	1	4.63	6.19	14.82	0.08	0.35	60.64	5.38	0.57	0.96	93.6
	2	8.35	7.16	13.91	0.20	0.30	53.62	5.15	1.07	1.47	91.2
	3	5.02	6.16	15.32	0.08	0.34	60.63	5.87	0.95	1.01	95.2
681	1	4.23	4.27	18.1	0.31	0.59	57.02	4.69	1.11	0.67	91.0
	2	5.40	5.09	18.31	0.0	0.64	53.63	5.00	0.59	0.93	89.6
	3	6.59	5.26	17.94	0.20	0.45	53.43	5.19	0.73	1.20	91.0
	4	7.44	5.92	17.22	0.12	0.26	55.14	4.66	1.39	1.38	93.5
740	1	16.44	5.73	17.06	0.0	0.37	48.10	1.64	2.00	3.32	94.7
	2	10.81	4.27	19.12	0.0	0.42	52.49	1.38	1.26	3.16	92.9
	рутил	3.50	3.03	97.2	0.17	0.0	4.32	1.19	0.74	1.01	111

Таблица 2. Результаты локального рентгеноспектрального анализа синтезированного титаномагнетита (ТМ) (данные А.Н. Кононова).

	Химический состав, вес. %							
№ обр.	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	K_2O	др. эл.	Σ
Mag 1	0.16	16.02	0.01	73.38	0.04	0.01	0.49	89.63
Mag 2	0.44	16.70	0.20	74.82	0.22	0.04	0.5	92.43
Mag 3	0.66	17.15	–	76.21	0.26	0.07	0.5	94.35
Mag 4	0.63	15.82	0.31	73.51	–	–	0.49	90.28
Mag 5	0.93	18.23	0.43	80.10	0.01	–	0.51	99.69
Mag 6	0.39	14.28	–	69.04	–	0.06	0.47	83.76
Mag 7	0.44	17.08	0.01	76.50	–	0.05	0.5	94.08
Mag 8	0.5	18.43	0.05	80.58	–	0.11	0.51	99.67

как наиболее вероятное значение температуры Кюри магнитной фазы. На DTF образцов № 684а и 684в было обнаружено два максимума. Температура Кюри ферримагнитных зерен образцов № 684а, 684б, 681 согласно данным термомагнитного анализа колебалась от 185 до 350°С (см. табл. 3). По измеренным температурам Кюри при известном содержании TiO_2 в титаномагнетите, используя зависимость изменения температуры Кюри титаномагнетитов при однофазном окислении [Readman and O'Reilly, 1971], была рассчитана степень однофазного окисления (Z) титаномагнетитовых зерен исследованных нами образцов.

Результаты расчетов, представленные в табл. 3, показывают, что степень однофазного окисления довольно высока. Даже в пределах одного образца степень однофазного окисления зерен колебалась довольно значительно. Так, например, магнитная фракция образцов № 684в, 684а была представлена двумя фазами со степенью однофазного окисления $Z \cong$ (0.15 и 0.85) и $Z \cong$ (0.45 и 0.75) соответственно. Наименьшей неоднородностью по степени окисления обладала магнитная фракция образцов № 681 (Z = (0.49–0.58)).

Намагниченность насыщения и остаточная намагниченность насыщения образцов № 740 после нагрева до 600°С изменялась незначительно, а измеренная температура Кюри оказалась равной 530°С при довольно значительном содержании TiO_2 в зернах, равном (17–19) вес. %. На основе этого было заключено, что титаномагнетит в этих образцах претерпел распад в естественных условиях с образованием фазы, обедненной титаном.

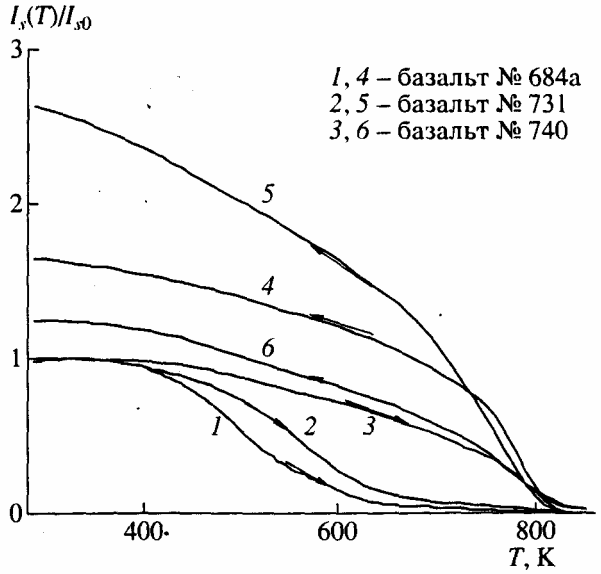

Рис. 1 . Изменение намагниченности насыщения образцов базальтов горы Ампер при нагреве и охлаждении.

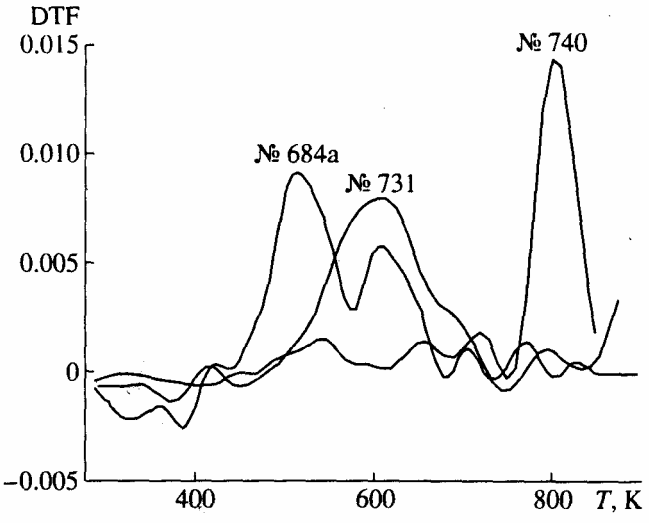

Рис. 2. Кривые спектрального термомагнитного анализа образцов базальтов горы Ампер.

Таблица 3. Параметры пьезовязкого намагничивания базальтов горы Ампер и синтезированного титаномагнетита при нормальных условиях и при воздействии P = 160 МПа в поле H = 330 А/м.

Образцы	I_{rP} 10^{-2}, А/м	S_r	S_{rP}/S_0	S_V, А/м	$\frac{\Delta I_{rPV}}{I_{rV}}$ (t = 20 час)	T_c, °C	X $Fe_{3-x}Ti_xO_4$	Z
*)681	24.2	3.85×10^{-3} А/м	5.0	224	5.0	185	0.66–0.7	0.5–0.58
731	73.9	5.1×10^{-2} (А/м)$^{0.5}$	2.7	144	7.29	332	–	
684а	33.1	4.0×10^{-2} (А/м)$^{0.5}$	2.6	40	6.76	250, 335	0.54–0.6	0.45–0.75
684в	31.5	9.8×10^{-2} (А/м)$^{0.5}$	2.0	192	4.0	220, 350	0.53–0.6	0.15–0.85
740	7.1	2.67×10^{-2} (А/м)$^{0.5}$	1.4	8	1.96	530	0.7–0.74	≅1
*)ТМ	5.7×10^{-3} А м^2/кг	0.52×10^{-3} А/м	1.8	200	1.8	230	0.47–0.5	≅0

*) Параметры вязкости этих образцов рассчитаны по линейной аппроксимации $I_{rV} = f(\mathrm{Lg}(t/t_0))$, остальные – по $(I_{rV}^{1/2} = f(\mathrm{Lg}(t/t_0))$.

Зерна синтезированного титаномагнетита по данным термомагнитного анализа были практически неокислены. Об этом свидетельствовали близость термомагнитных кривых $I_s(T)$ при нагреве образцов и их охлаждении и соответствие измеренной температуры Кюри T_C = 225°C содержанию титана в титаномагнетитовых зернах [Readman and O'Reilly, 1971; Нагата, 1965].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПЬЕЗОВЯЗКОМУ НАМАГНИЧИВАНИЮ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения поставленной задачи были проведены исследования влияния давления на процессы вязкого намагничивания описанных выше пород. Измерение остаточной намагниченности предварительно размагниченных переменным магнитным полем образцов после воздействия магнитного поля и давления проводилось по следующей схеме $H^+P^+t^+P^-H^-$, т.е. включение поля, наложение давления, выдержка в условиях сжатия в течение определенного времени, снятие давления, выключение поля. Давление создавалось в ячейке типа "линза" [Максимочкин и Мигранова, 1990]. В качестве передающей давление среды использовался пирофилит. Усилия создавались с помощью немагнитного гидравлического пресса, изготовленного из титана, который помещался в кольца Гельмгольца. Остаточная намагниченность измерялась с помощью ИОНа типа рок–генератор.

Эксперименты показали, что наложение и снятие давления (P) в присутствии магнитного поля (H), как и следовало ожидать, приводит к образованию пьезоостаточной намагниченности. Временные выдержки в условиях повышенных давлений приводят к довольно значительному дополнительному росту остаточной намагниченности на фоне пьезоостаточной. Изменение со временем пьезоостаточной намагниченности базальтов горы Ампер, полученной по указанной выше схеме, показано на рис. 3 . Дополнительное приращение I_{rP} на исследованных образцах за время порядка 20 часов составило от 30 до 60% от пьезоостаточной намагниченности и превышало величину вязкой остаточной намагниченности (I_{rV}), полученной при нормальных условиях в течение того же времени в несколько раз. На рис. 4 на образцах базальта № 684в для сравнения показан рост вязкой остаточной намагниченности (I_{rV}) со временем и рост пьезовязкой остаточной намагниченности (I_{rPV}), полученной при выдержке в магнитном поле в условиях сжатия по указанной выше схеме.

Как видно из рис. 3 и 4, зависимость как вязкой, так и пьезовязкой остаточных намагниченностей от времени оказалась более сложной, чем логарифмическая. Удовлетворительно линейной функцией от логарифма времени описывалась зависимость

$$\sqrt{\Delta I_{rV}} = f(\log(t)),$$

по тангенсу угла наклона которой рассчитывался коэффициент магнитной вязкости S_{rP}. Как видно из табл. 3, коэффициент S_{rP}, определенный по пьезовязкой остаточной намагниченности, превышает коэффициент S_r, определенный по вязкой остаточной намагниченности, полученной при нормальных условиях на различных образцах в 1.4–5 раза. Величина приращения пьезоостаточной намагниченности ($\Delta I_{rPV} = I_{rPV} - I_{rP}$) за время выдержки образцов базальтов под давлением в магнитном поле в течение 20 часов превышала величину вязкой остаточной намагниченности, обра-

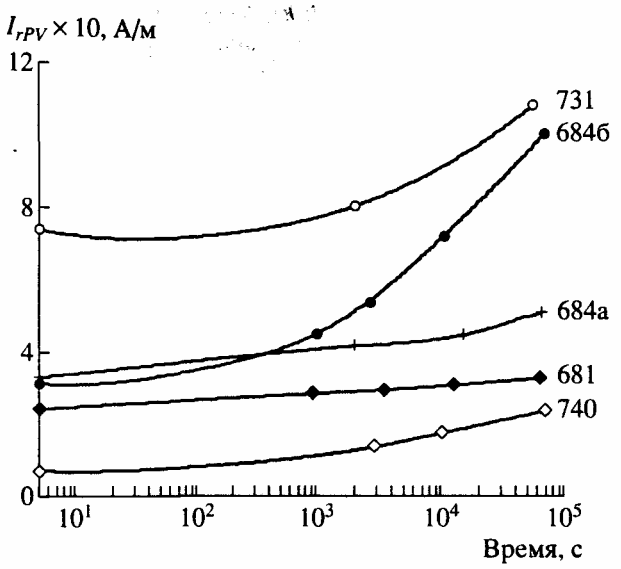

Рис. 3. Изменение пьезоостаточной намагниченности образцов базальтов горы Ампер со временем выдержки их в магнитном поле напряженностью 330 А/м в условиях квазивсестороннего сжатия P = 160 МПа.

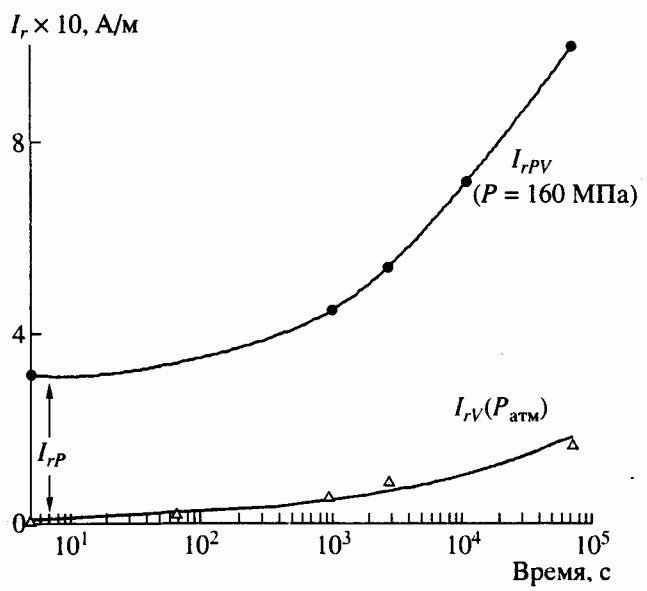

Рис. 4. Изменение со временем вязкой (I_{rV}) и пьезовязкой (I_{rPV} при P = 160 МПа) намагниченностей образца базальта № 684в горы Ампер в поле напряженностью 330 А/м.

зуемой в течение того же времени в 1.8–7.3 раза.

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что на образцах с титаномагнетитовыми зернами, находящимися на средней стадии однофазного окисления (Z = 0.45–0.75), влияние давления на скорость вязкого намагничивания в несколько раз больше, чем на синтезированных титаномагнетитах и на образцах с гетерогенно окисленными титаномагнетитовыми зернами (обр. № 740).

Согласно теоретическим представлениям [Трухин, 1973; Трухин и др. 1973; Безуглая и др., 1973], рост вязкой остаточной намагниченности в многодоменных зернах происходит за счет дополнительного смещения доменных границ с течением времени и определяется в основном диффузией дефектов в решетке кристалла, а коэффициент магнитной вязкости увеличивается с ростом количества этих дефектов.

Образование пьезовязкой остаточной намагниченности можно представить следующим образом. При наложении давления магнитная структура зерен ферримагнитной фракции горных пород переходит в метастабильное состояние. Под действием давления происходят довольно быстрые измерения структуры барьеров, зависящих от магнитоупругой энергии. При наличии внешнего магнитного поля происходит направленное смещение доменных границ, образуется пьезоостаточная намагниченность. Под воздействием квазивсестороннего сжатия, вероятно, может происходить также и медленное изменение структуры дефектов, что будет приводить к дополнительному смещению доменных границ со временем и образованию вязкой намагниченности при воздействии магнитного поля на фоне пьезоостаточной. Процесс носит релаксационный характер. По мере роста давления поток диффундирующих дефектов растет, что будет приводить к росту коэффициента магнитной вязкости. Данная концепция позволяет довольно удовлетворительно объяснить влияние однофазного окисления титаномагнетита в базальтах на скорость пьезовязкого намагничивания. Действительно, при росте степени однофазного окисления титаномагнетита количество вакансий в **B**-подрешетке, как известно [Sakamoto и др, 1968; Readman and O'Reilly, 1972] растет, образуется так называемый катиондефицитный титаномагнетит. Из-за магнитоупругого взаимодействия давление будет приводить к перераспределению вакансий по B-узлам и, следовательно, к увеличению скорости вязкого намагничивания за счет дополнительной диффузии вакансий. Это будет приводить к бóльшему росту магнитной вязкости при воздействии давления на образцах с признаками однофазного окисления титаномагнетитовых зерен, чем на образцах с неокисленными титаномагнетитовыми зернами. Действительно, эксперименты показали, что при степени однофазного окисления Z = (0.45–0.85) влияние давления на процессы пьезовязкого намагничивания в 2–4 раза превышает аналогичное влияние на неокисленных титаномагнетитах либо на образцах с признаками высокотемпературного окисления (обр. № 740).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных экспериментов и анализа результатов можно сделать следующие выводы:

1. После выдержки образцов базальтов под давлением в магнитном поле образуется пьезоостаточная намагниченность большей величины, чем при кратковременном наложении и снятии давления. Разница между эти намагниченностями, названная пьезовязкой остаточной намагни ченностью, при P = 160 МПа в 1.8-7.3 раза превы шает вязкую остаточную намагниченность, полу ченную при нормальном давлении и сравнима с пьезоостаточной намагниченностью.

2. Степень влияния давления на процесс пьезовязкого намагничивания в базальтах зависит от степени однофазного окисления титаномагнетита. При степени однофазного окисления Z = (0.4-0.75) влияние давления на процессы пьезовязкого намагничивания в 2-4 раза превышает аналогич ное влияние на неокисленных титаномагнетитах либо на образцах, претерпевших высокотемпера турное гетерогенное окисление титаномагнетита.

3. Большее влияние давления на пьезовязкое намагничивание однофазно окисленных титаномагнетитов объясняется дополнительной мигра цией вакансий под действием давления в решетке катиондефицитной шпинели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

БезуглаяЛ.С., Максудов С.Х., Сковородкин Ю.П. Вязкое намагничивание горных пород под давлением // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1973. № 4. С. 110-113.

Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1033 с.

Городницкий А.М., Назарова Е.А. Геомагнитное изучение подводной горы Ампер // Бюл. Моск. общества испытателей природы, отд. геол. 1984. Т. 59. Вып. 3. С. 124-128.

Иванов А.П., Сафрошкин В.Ю., Трухин В.И. и др. Спектральный термомагнитный анализ горных пород // Физика Земли. 1992. № 3. С. 62-71.

Максимочкин В.И., Мигранова С.Г. Установка для исследования магнитных свойств горных пород при высоких давлениях и температурах. Магнитные свойства минералов и проблемы палеомагнетизма и петромаг-нетизма. Магадан, 1990. С. 168-172.

Нагапетян В.В. Исследование вязкой остаточной намагниченности образцов горных пород Армянской ССР под действием давления и температуры // Изв. АН Армянской ССР. Наука о Земле. 1987. Т. 40. № 1. С. 67-76.

Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 347с.

Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и их практическое применение. М.: Мир, 1987. Т. 2.419с.

Трухин В.И. Введение в магнетизм горных пород. М.: Моск. ун-т, 1973. 275 с.

Трухин В.И., Большаков В.А., Тарловский З.О. О механизме вязкого намагничивания в горных породах // Геомагнетизм и аэромагнетизм. 1973. Т. 13. № 5. С. 911-916.

Трухин В.И., Максимочкин В.И. Исследование кинетики процессов окисления ферримагнитной фракции подводных базальтов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982.№ 11. С. 39-51.

O-ima M., Larson E.E. Low- and High-Temperature oxidation of titanomagnetite in relation to irreversible changes in the Magnetic Properties of Submarine Basalts // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 1003-1017.

Readman R.W., O'Reilly W. The synthesis and inversion of non-stoichiometric titanomagnetites // Phys. Earth and Planet Inter. 1971. V. 4. №2. P. 121-128.

Readman P.W., O'Reilly W. Magnetic properties of oxidized (cation deficient) titanomagnetites (Fe, Ti, D)$_3$O$_4$//Geomag-net. Geoelectr. 1972. V. 24. № 1. P. 69-90.

Sakamoto N., Ince P.I., O'Reilly W. The effect of wet-grinding on the oxidation of titanomagnetites // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1968. V. 15. P. 509-516.