

УДК 550:382.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ПОДВОДНЫХ БАЗАЛЬТОВ КРАСНОГО МОРЯ И ДРУГИХ РИФТОВЫХ ЗОН

Е. С. Курочкина

(кафедра физики Земли)

E-mail: kurochkina@phys.msu.ru

Подробно изучены магнитные свойства базальтов молодой рифтовой зоны Красного моря. Показано, что особенности магнитных свойств базальтов свидетельствуют о сложном характере эволюции красноморской рифтовой зоны. Проведен сравнительный анализ магнитных характеристик базальтов рифтовой зоны Красного моря и других рифтовых зон. Установлены причины повышенных значений естественной остаточной намагниченности I_n и фактора Кенигсбергера Q_n базальтов Красного моря.

Согласно современным представлениям, Красное море — типичный пример межконтинентальных рифтовых зон [1].

При исследовании магнитных свойств подводных базальтов Красного моря выявились некоторые особенности их характеристик. В частности, авторами [2] было показано, что они обладают аномально высокими значениями естественной остаточной намагниченности I_n и фактора Кенигсбергера $Q_n = k_0 H_T$. Эти результаты были получены в комплексной геолого-геофизической экспедиции Института океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР (1980 г.).

С целью выяснения причин повышенных значений I_n и Q_n базальтов Красного моря было решено провести сравнительный анализ магнитных свойств этих базальтов с магнитными свойствами базальтов других рифтовых зон.

Нами было проведено детальное исследование магнитных свойств коллекции образцов красноморских базальтов, предоставленной сотрудником Института океанологии им. П.П. Ширшова проф. А. А. Шрейдером.

Согласно данным геохимического анализа [3], валовой состав окислов примерно одинаков по образцам коллекции: содержание SiO_2 50–52%, TiO_2 — 0.72–1.62, Al_2O_3 — 13–16, Fe_2O_3 — 1–3, FeO — 9–10%. Видимо, такой состав пород характерен для всей рифтовой зоны Красного моря, так как петрографический анализ, проведенный авторами [4], исследовавшими образцы драгированных базальтов, расположенных в северной части красноморского рифта (около 23° с.ш.), показал сходные результаты (содержание SiO_2 48–50%, TiO_2 — 0.5–1.5, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ — 8–12%) с результатами петрографического анализа базальтов из исследуемого нами района (около 18° с.ш.), несмотря на то что рифтовая долина явно прослеживается только

в южной части Красного моря. Согласно [4], глубина подъема первичной магмы при образовании коры в районе Красного моря находилась в области давлений порядка 8–10 кбар. Разделение магмы на фракции начиналось при умеренных давлениях. Дифференциация завершилась ближе к поверхности.

В статье [5] был проведен термомагнитный анализ образцов (серия последовательных нагревов в присутствии сильного внешнего поля ($H = 0.3$ мТл) в условиях воздушной среды).

По результатам этого анализа все образцы базальтов Красного моря были разделены авторами на три группы согласно увеличению степени окисления. На рис. 1, а, б, в представлены типичные кривые $I_s/I_{s0}(T)$ образцов 1, 2 и 3-го типов соответственно. К 1-й группе были отнесены образцы, которые содержали титаномагнетитовые зерна с самой низкой степенью однофазного окисления; ко 2-й — находящиеся на более высокой стадии однофазного окисления, и к 3-й — образцы, имеющие в своем фазовом составе вторую, более высокотемпературную фазу. В табл. 1 приведены средние величины основных магнитных параметров для каждой из трех вышеописанных групп.

На рис. 2 представлена карта мест отбора образцов и участки отрезков предполагаемой оси спрединга (черные прямоугольники). Ранее было установлено [5], что среди образцов, отобранных вблизи предполагаемых отрезков оси рифта, были обнаружены образцы с высокой степенью окисления (образцы драг 65, 67), что нехарактерно для молодых океанских базальтов. Такими же свойствами обладали образцы из драги 53 (относящиеся ко второй группе), отобранные в южной части полигона в непосредственной близости от мест отбора образцов, ферримагнитные зерна которых слабо окислены (образцы 1-й группы). Эти данные могут

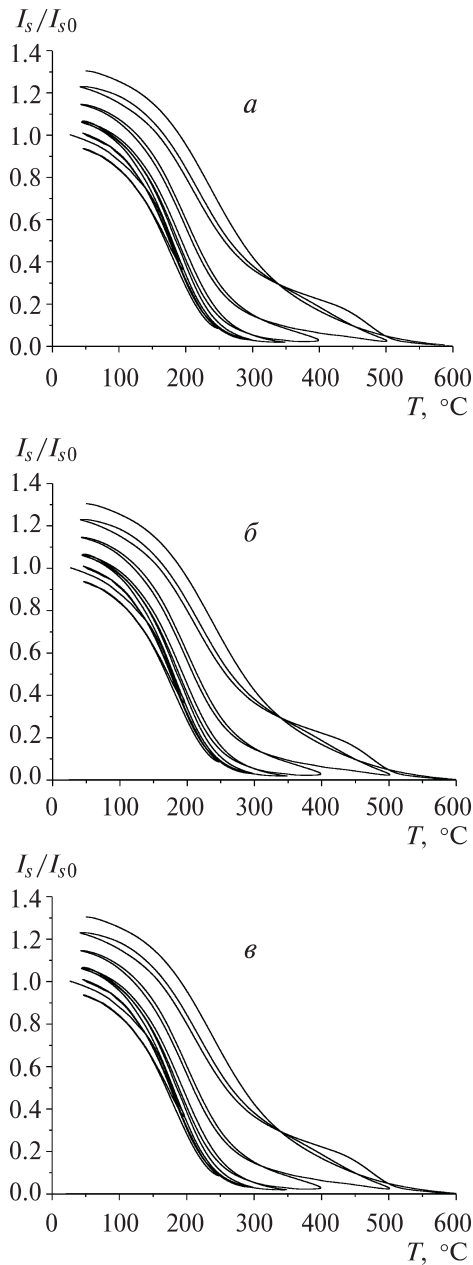


Рис. 1. Термомагнитный анализ образцов: кривые $I_s/I_{s0}(T)$

свидетельствовать о том, что океанская кора района исследования имеет сложную историю формирования. В близком соседстве находятся образцы, находящиеся на разных стадиях окисления.

Наличие сильноокисленных образцов (образцы 3-й группы) вблизи оси рифтовой зоны свидетельствует о том, что породы испытали на себе сильное воздействие природных факторов после их образования. Такими факторами могут быть вторичный разогрев пород, а также тектонические воздействия (давление, сдвиговые напряжения). Результаты лабораторных экспериментов (циклический нагрев образцов в воздушной среде до температуры 600°С), проведенных на образцах 1-й группы, показали, что зависимости $I_s(T)$ этих образцов после их нагрева до 500°С очень похожи на аналогичные

зависимости образцов 3-й группы. Откуда можно сделать вывод, что базальты с признаками гетерофазного окисления ферритмагнитных зерен (65-я драга) в естественных условиях испытали повторный разогрев приблизительно до 400–500°С.

Таблица 1
Средние величины магнитных параметров подводных базальтов некоторых рифтовых зон

Образцы	Возраст, млн лет	I_n , А/м	$k_0 \cdot 10^3$, ед. СИ	Q_n	I_{rs}/I_s	H_{cr} , мТл	T_c , °С
Красное море							
1-я группа	< 1	59	17	156	0.31	20	201
2-я группа	< 1	45	4.4	440	0.45	72	284
3-я группа	< 1	51	5	527	0.35	50	345, 460
Хребет Буве							
1-я группа	< 1	17	10	85	0.37	41	174
2-я группа	1–2	7	11	35	0.24	87	351
Хребет Шписс							
1-я группа	< 1	32	8	162	0.44	30	126
2-я группа	2–6	7	3	103	0.31	40	423
Хребет Рейкьянес							
1-я группа		11	14	37	0.35	26	196
2-я группа		15	3	120	0.44	76	275
Разлом Романш							
№ 29		1.4	2.2	23	0.39	56	250
№ 34		13.5	2.4	197	0.36	22	260
№ 42		11	18.0	39	0.19	14	380

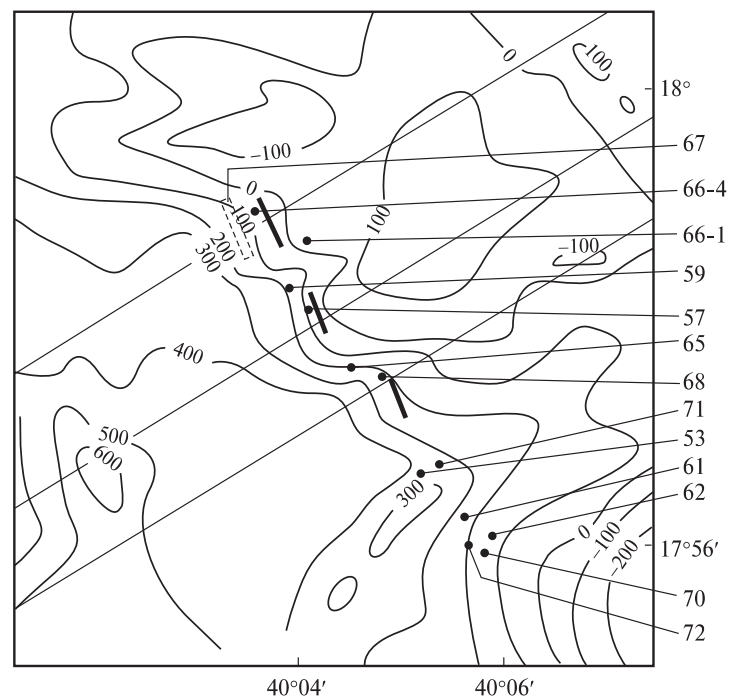


Рис. 2. Карта мест отбора образцов

На рис. 3 приведены изображения поверхностей образцов, полученные в отраженных электронах с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения Supra 50 VP (LEO, Германия, 2003). Как видно из рис. 3, *а*, у образца из первой группы ферримагнитные зерна более крупные ($\approx 3-10$ мкм). Заметим, что образцы 1-й группы имели более низкие значения Q_n , и высокие значения k (табл. 1), чем образцы 2-й группы, которые, как видно из рис. 3, *б*, имели более мелкие и вытянутые ферримагнитные зерна.

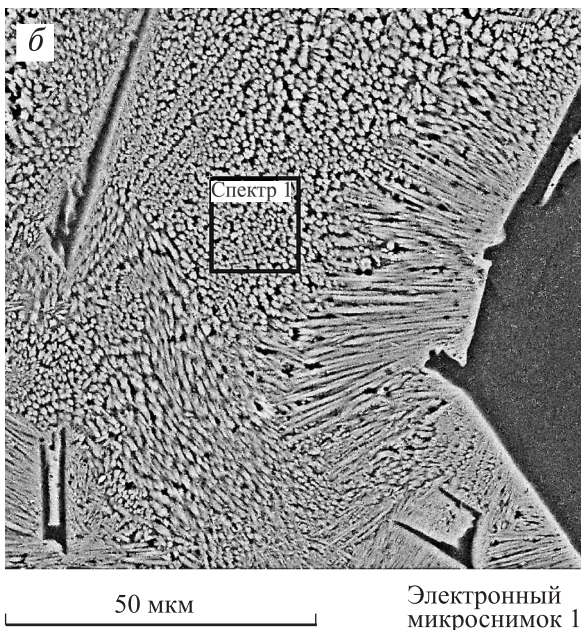
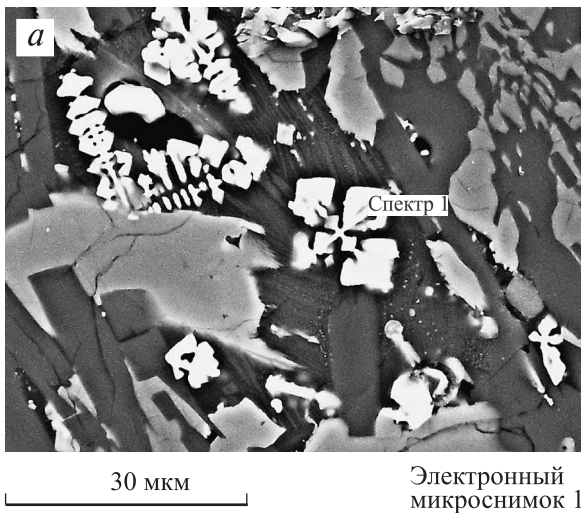


Рис. 3. Изображения поверхностей образцов в отраженных электронах (снимок сделан на сканирующем электронном микроскопе Supra 50 VP)

Высокие значения Q_n и низкие значения k образцов 2-й группы можно объяснить тем, что у образцов 2-й группы зерна практически однодоменные. При этом величина I_n с увеличением степени окисления (ср. образцы 1-й и 2-й групп) меняется

незначительно (уменьшается в среднем на 20%). Можно предположить, что достаточно большие значения I_n для образцов 2-й группы объясняются тем, что ферримагнитные зерна этих базальтов имеют вытянутую форму. Вследствие преобладания одноосной анизотропии они имеют большую магнитную жесткость, меньше подвержены влиянию размагничивающего поля.

С целью выяснения природы естественной остаточной намагниченности I_n были вычислены коэффициенты парной корреляции различных магнитных параметров базальтов Красного моря. Результаты представлены в табл. 2. Как видно, между параметрами I_n и k не наблюдается корреляции. Видимо, это связано с тем, что образцы подвергались вторичным воздействиям (повторный разогрев за счет извержения и тектонические воздействия), которые привели к образованию дополнительной химической или термоостаточной намагниченности. Вероятность приобретения химической намагниченности довольно высока, так как температура воды на дне в рифтовой зоне Красного моря примерно 20°C , что значительно выше, чем в других регионах. Между величинами k и Q_n корреляция достаточно высокая. Из табл. 2 видно, что коэффициент корреляции между этими величинами отрицателен, т.е. для образцов с большими значениями Q_n значения k невелики и наоборот. В пользу однодомности ферримагнитных зерен образцов Красного моря 2-й группы свидетельствуют следующие факторы: низкие значения k и высокие значения H_{cr} (табл. 1), средняя величина отношения $I_{rs}/I_s = 0.45$.

Таблица 2
Коэффициенты парной корреляции магнитных параметров базальтов Красного моря

I_n	0.18	0.28	-0.32	0.44	-0.45
k		-0.71	-0.77	-0.5	-0.74
Q_n			0.56	0.66	0.48
H_{cr}				0.46	0.66
I_{rs}/I_s					0.03
T					

Для выявления особенностей формирования базальтов различных рифтовых зон проводилось сравнение магнитных характеристик пород Красного моря и магнитных характеристик базальтов, драгированных в районе хребта Буве и в районе хребта Шписс (Южная Атлантика) [6]; в районе хребта Рейкьянес (Норвежско-Гренландский бассейн) [7, 8]; в районе трансформного разлома Романш (Центральная Атлантика) [9].

Для того чтобы получить общее представление о том, как соотносятся магнитные свойства базальтов Красного моря и других рассматриваемых районов, ниже приводятся их основные исходные магнитные характеристики. Данные для сравнения

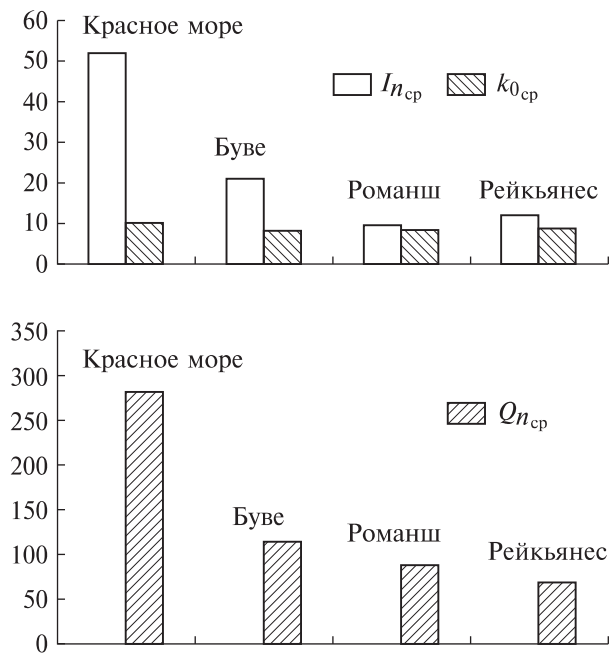


Рис. 4. Средние значения величин I_n , k , Q_n образцов различных рифтовых зон

были взяты по базальтам с точками Кюри, сходными с базальтами Красного моря.

На рис. 4 приведены гистограммы средних значений $I_{n, \text{ав}}$, $k_{\text{ав}}$ и $Q_{n, \text{ав}}$ для образцов рассматриваемых регионов. Явно видно, 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. Естественная остаточная намагниченность за счет процесса однофазного окисления с течением времени разрушается [10]. Высокие значения I_n для всей коллекции образцов Красного моря в целом, по-видимому, объясняются небольшим возрастом пород (табл. 3).

В табл. 1 приведены средние величины магнитных характеристик для образцов Красного моря, а также для образцов базальтов других регионов. Для базальтов других регионов было проведено разбиение на группы согласно величине точки Кюри

(степени окисления) и приведены средние по группам величины магнитных параметров.

Если рассматривать магнитные характеристики базальтов из района хребтов Буве и Шписс, то нетрудно заметить, что I_n у них в несколько раз меньше, чем у образцов Красного моря. Из табл. 1 видно, что у молодых образцов (< 1 млн лет) из хребта Шписс отношение $I_{rs}/I_s = 0.44$, что говорит о том, что зерна ферромагнитной фракции этих базальтов близки к однодоменным. При этом $Q_n = 162$. Вероятно, такая большая величина Q_n объясняется, как и в случае с красноморскими базальтами, мелким размером зерен ферромагнитной фракции.

Величина остаточной коэрцитивной силы H_{cr} также характеризует размеры ферромагнитных зерен. Согласно [11], остаточная коэрцитивная сила H_{cr} однодоменных зерен (для них характерны более высокие значения отношения I_{rs}/I_s) выше, чем для многодоменных. Однако для хребта Буве не было обнаружено высоких значений H_{cr} при низких I_{rs}/I_s . Авторы [6] полагают, что причиной этого являются повышенные напряжения *in situ* в соответствующей области океанского дна.

Образцы базальтов, имеющие ферромагнитную фазу с точкой Кюри $T > 350^\circ\text{C}$ вероятнее всего в природе были подвергнуты гетерофазному окислению [12, 13]. Можно видеть (табл. 1), что к таким гетерофазно-окисленным образцам относятся 3-я группа образцов коллекции Красного моря, 2-я группа хр. Буве и 2-я группа хр. Шписс.

В коллекции из хребта Рейкьянес часть образцов по магнитным характеристикам была близка к базальтам Красного моря. Для облегчения анализа образцы Рейкьянеса аналогично красноморским были разбиты по степени окисления ферромагнитных зерен на две группы. За основу разбиения взят тот же принцип зависимости T_C от степени окисления, что и для красноморских базальтов.

В табл. 4 приведены коэффициенты парной корреляции магнитных параметров базальтов хребта Рейкьянес. Корреляционный коэффициент между величинами T_C и H_{cr} высокий и положительный, следовательно, можно утверждать,

Таблица 3

Диапазон величин и средние значения основных магнитных параметров подводных базальтов некоторых рифтовых зон

Регион	I_n , А/м	$k_0 \cdot 10^3$ ед. СИ	Q_n	T_C , °С	Возраст, млн лет
Красное море (2006 г.)	4–107.9	2.5–26.1	41–637	172–384	< 1
	52	10	287	260	
Хребет Буве (Ю. Атлантика)	1–74	1–19	5–272	150–310	0.8–6.7 2.5
	21	8	113	181	
Разлом Романш (Ц. Атлантика)	1–18	1–59	2–445	250–380	Нет данных
	9	8	86	296	
Хребет Рейкьянес	5–30	3–18	8–120	160–280	1–2
	12	8	67	248	

Таблица 4
Коэффициенты парной корреляции магнитных параметров базальтов хребта Рейкьянес

I_n	-0.19	0.86	0.05	-0.45	-0.11
k	-0.43		-0.74	-0.66	-0.84
		Q_n	0.37	0.4	0.14
			H_{cr}	0.45	0.8
				I_{rs}/I_s	0.4
					T

что с увеличением температуры Кюри растет и остаточно-коэрцитивная сила. При этом магнитная восприимчивость k уменьшается (коэффициент корреляции между T_C и k отрицательный).

Из табл. 4 видно, что для образцов хр. Рейкьянес величина Q_n определяется в основном значением остаточной намагниченности I_n . Также хорошо коррелируют значения начальной магнитной восприимчивости k и параметры H_{cr} и I_{rs}/I_s , характеризующие размер зерен. Видимо, это связано с тем, что зерна ферромагнитной фракции в более окисленных образцах более мелкие.

В табл. 1 приведены магнитные характеристики нескольких образцов коллекции из трансформного разлома Романш [9], близких по величинам точек Кюри к красноморским базальтам. Заметим, что для образца № 34 значение Q_n достаточно высокое и сравнимо с Q_n для 1-й группы красноморских базальтов. Авторы [9] пришли к заключению, что этот образец находился в зоне нового извержения и соответственно имеет малый возраст.

Из приведенного анализа параметров k , I_{rs}/I_s , H_{cr} для образцов из различных рифтовых зон можно сделать вывод, что вероятнее всего зерна ферромагнитной фракции базальтов Красного моря и хр. Рейкьянес имеют меньший размер, чем у базальтов хр. Буве, Шписс и разлома Романш. Логично предположить, что при кристаллизации базальта размер зерна ферромагнитной фракции определяется тем, насколько быстро охлаждалась излившаяся магма (чем быстрее охлаждение, тем мельче зерно). Поэтому применительно к рифтовой зоне Красного моря, можно предположить, что охлаждение магмы при образовании коры происходило быстрее, чем в других регионах. Это может объясняться более высокой скоростью поступления магмы либо тем, что магма в рифтовой зоне Красного моря изливается под меньшим давлением.

В результате проведенного сравнительного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Ферромагнитная фракция образцов Красного моря представлена в основном однодоменными и псевдооднодоменными зернами. Это может объясняться большей скоростью охлаждения магмы.

2. Базальты Красного моря имеют аномально высокие величины естественной остаточной намагниченности по следующим причинам:

1) базальты Красного моря сравнительно молодые (по сравнению с другими регионами), и I_n не успела сильно разрушиться под воздействием процесса однофазного окисления;

2) возможно, базальты Красного моря подвергались вторичным воздействиям, что спровоцировало образование вторичной химической или термоостаточной намагниченности.

3. Базальты Красного моря имеют аномально высокие величины фактора Кенигсбергера Q_n , потому что, во-первых, подавляющее большинство образцов имеют высокие значения I_n (по сравнению с образцами из других регионов); во-вторых, самые высокие значения Q_n объясняются преобладанием в ферромагнитной фракции образцов мелких однодоменных зерен с низкой степенью однофазного окисления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 65-05-65053).

Литература

1. *Le Pichon X., Heirtzen J.* // Geophys. Res. 1968. **73**. P. 2101.
2. *Трухин В.И., Шрейдер А.А., Сычев В.А.* // Океанология. 1982. **XXII**, № 3. С. 439.
3. *Альмухамедов А.И., Кашиинцев Т.Л., Матвеенков В.В.* Эволюция базальтового вулканизма Красноморского региона. Новосибирск, 1985.
4. *Antonini P., Petrini R., Contin G.* // J. of African Earth Sciences. 1998. **27**. № 1. P. 107.
5. *Трухин В.И., Максимочкин В.И., Жилева В.А.* и др. // Физика Земли. 2006. № 11. С. 70.
6. *Трухин В.И., Жилева В.А., Шрейдер А.А.* // Физика Земли. 2002. № 8. С. 6.
7. Рифтовая зона хребта Рейкьянес / Под ред. А. П. Лисицина, Л. П. Зоненшайна. М., 1990.
8. *Кашиинская И.В.* Особенности намагничивания подводных базальтов некоторых районов Атлантического океана: Канд. дис. М., 1988.
9. *Трухин В.И., Шрейдер А.А., Жилева В.А.* и др. // Физика Земли. 2005. № 3. С. 3.
10. *Marshall M., Cox A.* // J. Geophys. Res. 1972. **77**. P. 6459.
11. *Dunlop D.J., Özdemir Ö., Enhin R.J.* // Phys. Earth Planet Int. 1987. **49**. P. 181.
12. *Tadashi Nishitani, Masaru Kono.* // J. R. Astr. Soc. 1983. **74**. P. 585.
13. *Трухин В.И., Максимочкин В.И.* // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 11. С. 39.

Поступила в редакцию
04.12.06