

УДК 552.313

О РЕГИОНАЛЬНЫХ И ГЛОБАЛЬНЫХ ПЕТРОХИМИЧЕСКИХ ТРЕНДАХ В СОСТАВЕ НЕОВУЛКАНИЧЕСКИХ БАЗАЛЬТОВ СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТОВ

© 2002 г. В. Н. Шарапов, А. С. Жмодик

Представлено академиком В.В. Ревердатто 18.01.2002 г.

Поступило 05.02.2002 г.

Информация, накопленная за многолетний период изучения петрохимии и геохимии базальтов срединно-океанических хребтов (MORB), позволила установить ряд важных закономерностей их состава и породила дискуссии о структуре и динамике развития магматических систем под гребнями срединно-океанических хребтов (COX) [1–3 и др.]. Обсуждения касаются главным образом статистической картины распространенности отдельных петрохимических групп, их сопряженности с геодинамическими и структурно-морфологическими характеристиками хребтов и трансформных разломов, локальных вариаций геохимии базальтов в отдельных сегментах COX, в поперечных сечениях гребня COX, а также связи состава базальтов со скоростью спрединга, ассимиляцией и т.д. [1–8 и др.]. Появление в Интернете баз данных по составу MORB [RIDGE Petrological Data Base (LDEO), Smithsonian Volcanic Glass File] позволяет рассмотреть эти массивы информации с точки зрения вида пространственных функций распределения отдельных петрогенных компонентов (наличие или отсутствие периодичности, колебание состава по пространственной координате типа “белого шума”, существование линейного тренда и т.п.). Как предполагается [2, 3 и др.], последние отражают интегрированные характеристики исходного состава и эволюции магматических систем в разных секторах и сегментах COX. Несмотря на упомянутый разносторонний анализ за рамками существующих дискуссий остался вопрос об общем виде функций распределения петрогенных компонентов по простиранию хребтов в фиксированные моменты их эволюции. Последние наиболее просто выявить при рассмотрении “узкого” временного среза петрохимических данных. В таком контексте наиболее удобным объектом исследования являются стекловатые неовулканические базальты

гребневых зон COX, возраст которых не превышает 1 млн. лет.

Учитывая это, мы провели комплексную статистическую обработку информации о петрохимии стекловатых MORB, содержащуюся в указанных выше файлах, а также литературных и оригинальных данных, обратив наибольшее внимание на вид пространственных функций распределения. Неизбежно при этом было ранжирование петрохимических групп и их пространственного распределения в COX типа того, что было проведено в [3]. Локальные вариации петрохимических составов стекловатых базальтов отдельных сегментов COX определяются количественным соотношением совокупностей таких петрохимических групп, которые представляют локальные фрагменты общей функции распределения для конкретных COX. Для нас не было неожиданностью, что при соотнесении полученных совокупностей петрохимических групп с тектоническими подразделениями хребтов (Срединно-Атлантический хребет (САХ), Восточно-Тихоокеанское поднятие (ВТП), Индийский и т.д.) подтвердились для САХ известные оценки пространственной распространенности отдельных петрохимических групп ТОР (толеиты океанических рифтов) [3]. Отметим [9], что в отдельных мелких сегментах разных COX может быть проявлено 3–5 петрохимических групп.

Анализ общих функций распределения содержания петрохимических компонентов в COX с точки зрения локальных величин дисперсий, средневзвешенных составов, матриц ковариаций и т.д. выявил в них соответствующими методами обработки периодических функций [10] неслучайные периодические колебания и существование региональных петрохимических, а при достаточно детальном опробовании (как в случае САХ) и глобальных трендов (рис. 1). В “свернутом виде” их характер отражается в матрице ковариационных линейных связей петрохимических компонентов и пространственных координат в указанных COX (табл. 1, 3).

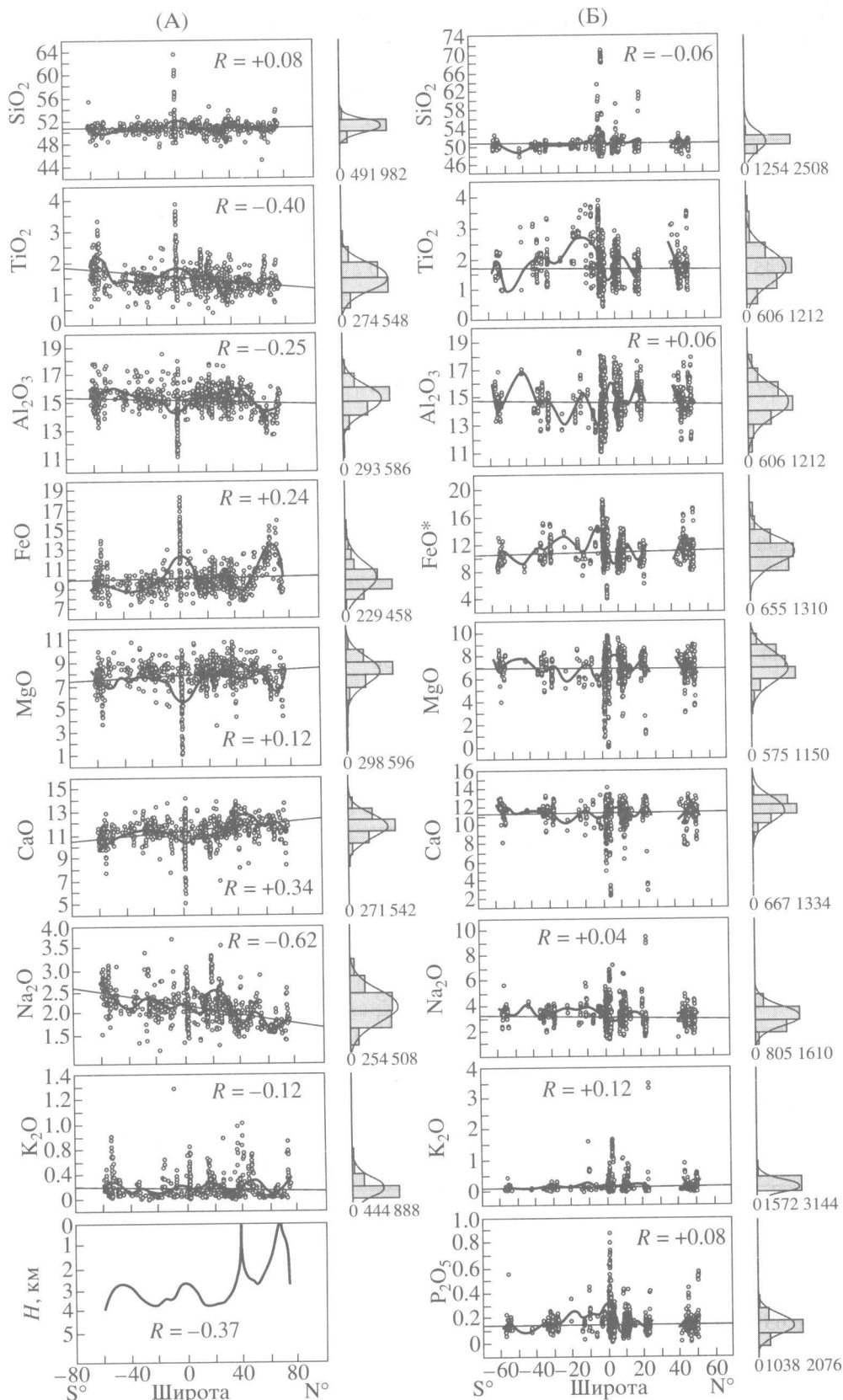


Рис. 1. Области опробования гребней COX Атлантического (А, $n = 3747$) и Тихого (Б, $n = 3167$) океанов, вид пространственных функций вариаций составов стекловатых неовулканических базальтов и их линейных трендов, величины значимых коэффициентов корреляций, определяющих их вид, а также гистограммы распределения содержаний петрогенных компонентов. Для Атлантического хребта приведен вид функции распределения глубин излияния стекловатых небазальтов.

Таблица 1. Ковариационная матрица линейных связей петрохимических компонентов и пространственных координат для разных участков САХ (приведены только значимые коэффициенты)

Разломные зоны в САХ ($n = 310$)										
Переменные	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Широта
TiO ₂	0.47									
Al ₂ O ₃	-0.55	-0.83								
FeO	0.37	0.90	-0.89							
MgO	-0.60	-0.93	0.85	-0.87						
CaO	-0.45	-0.88	0.60	-0.75	0.82					
Na ₂ O	0.58	0.73	-0.49	0.56	-0.74	-0.83				
K ₂ O	0.40	0.79	-0.56	0.65	-0.84	-0.83	0.66			
P ₂ O ₅	0.48	0.90	-0.66	0.74	-0.89	-0.90	0.77	0.92		
Глубина (H)	-0.29	-0.69	0.51	-0.59	0.72	0.61	-0.40	-0.78	-0.72	-0.47
Широта		0.37	-0.49	0.54	-0.41	-0.17	-0.16	0.41	0.32	
САХ 59° ю.ш. – 73° с.ш. ($n = 3747$)										
Переменные	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Широта
TiO ₂	0.11									
Al ₂ O ₃	-0.40	-0.35								
FeO	0.05	0.42	-0.80							
MgO	-0.41	-0.76	0.62	-0.60						
CaO	-0.13	-0.80	0.14	-0.34	0.64					
Na ₂ O		0.70	0.22	-0.09	-0.38	-0.75				
K ₂ O	0.18	0.46		-0.10	-0.51	-0.44	0.31			
P ₂ O ₅	0.19	0.78	0.19	0.16	-0.68	-0.65	0.55	0.78		
Глубина (H)		0.05	0.35	-0.43	0.24	-0.07	0.39	-0.14	-0.06	-0.37
Широта	0.08	-0.40	-0.25	0.24	0.06	0.34	-0.62	-0.12	-0.31	
САХ 8° с.ш. – 73° с.ш. ($n = 2321$)										
Переменные	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Широта
TiO ₂	0.20									
Al ₂ O ₃	-0.56	-0.38								
FeO	0.09	0.49	-0.67							
MgO	-0.50	-0.75	0.56	0.51						
CaO	-0.09	-0.76	0.08	-0.39	0.55					
Na ₂ O		0.76	0.12	0.14	-0.47	0.81				
K ₂ O	0.16	0.24	0.09	-0.32	-0.39	-0.16	0.12			
P ₂ O ₅	0.24	0.65	-0.18		-0.61	-0.45	0.44	0.73		
Глубина (H)	0.06	0.31	-0.12	0.12	-0.07	-0.23	0.31	-0.21		-0.66
Широта		-0.36	-0.05			0.36	-0.49	0.19	-0.07	
САХ 10° ю.ш. – 45° ю.ш. ($n = 241$)										
Переменные	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Широта
TiO ₂	0.45									
Al ₂ O ₃	-0.51	-0.66								
FeO		0.62	-0.63							
MgO	-0.63	-0.80	0.64	-0.48						
CaO	-0.25	-0.86	0.39	-0.57	0.62					
Na ₂ O	0.37	0.84	-0.40	0.44	-0.75	-0.87				
K ₂ O	0.44	0.56	-0.22		-0.65	-0.67	0.66			
P ₂ O ₅	0.39	0.76	-0.39	0.35	-0.65	-0.77	0.73	0.71		
Глубина (H)									-0.15	0.37
Широта			-0.22	0.16		0.27	-0.31	-0.34	-0.30	

Таблица 1. Окончание

САХ 10° ю.ш. – 59° ю.ш. (n = 609)

Переменные	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Широта
TiO ₂	0.24									
Al ₂ O ₃	-0.48	-0.72								
FeO	0.15	0.83	-0.81							
MgO	-0.40	-0.92	0.75	-0.81						
CaO	-0.20	-0.90	0.53	-0.74	0.82					
Na ₂ O	0.22	0.78	-0.41	0.59	-0.78	-0.86				
K ₂ O	0.22	0.82	-0.50	0.59	-0.81	-0.79	0.61			
P ₂ O ₅	0.27	0.91	-0.59	0.70	-0.87	-0.88	0.74	0.92		
Глубина (H)	-0.19	-0.48	0.40	-0.41	0.50	0.38	-0.16	-0.63	-0.57	
Широта	0.14	-0.47		-0.26	0.44	0.49	-0.66	-0.38	-0.44	

Рассмотрение данных, приведенных на рис. 1, показывает значительную неоднородность и фрагментарность опробования гребней СОХ по их простиранию. Поэтому получаемые аппроксимации общего вида петрохимических функций распределения состава стекловатых MORB на основе имеющегося уже материала можно относить только к первому приближению. По этой причине наиболее последовательно можно рассмотреть одну из перечисленных выше задач описания пространственных функций распределения петрогенных компонентов – оценку вида трендов. Такая возможность следует из того, что для выявления вида линейного тренда важно наличие частных сечений рассматриваемой функции относительно однородно распределенных вдоль гребня СОХ, в которых устойчивы распределения частот встречаемости индивидуальных составов. Мы попытались проверить выполнение этого условия [10]. Для Центрального сегмента САХ был проведен следующий численный эксперимент. Случайно изменялся объем выборки от нескольких десятков анализов до нескольких сот. При сравнении оценок средних и дисперсий содержаний петрогенных компонентов в таких вариантах оказалось, что они различаются несущественно. Поэтому приведенный на рис. 1 вид аппроксимации функций распределения и полученные с помощью стандартных вычислительных процедур линейные тренды можно принять в виде начального приближения, отражающего региональные и глобальные неоднородности в составах стекловатых MORB по простиранию СОХ.

Кратко прокомментируем полученные результаты в указанном отношении: 1) в “широтных” СОХ в функциях распределения петрогенных компонентов в районе экватора отмечается узкая область (“раздел”), где максимальны дисперсии (практически в два раза большие, чем в прилегающих сегментах СОХ); 2) севернее и юж-

нее этого “раздела” средневзвешенные составы базальтов в секторах, а также вид спектра вариаций составов в функциях распределения отдельных петрогенных компонентов различны. Наиболее существенно то, что выявляется глобальный линейный тренд в СОХ в Атлантическом (в Индийском океане (табл. 3) выявляется аналогичная картина) океане (рис. 1А). Для хребтов Тихого океана, из-за разрыва в северном секторе областей спрединга (рис 1Б), строго говоря, нельзя построить “непрерывные” функции распределения. “Общий” формальный вид таковых, с учетом разрыва, приведен на рис. 1Б. Для южного сектора Восточно-Тихоокеанского поднятия (от экватора до 42° ю.ш.) выявляются линейные тренды (см. табл. 3 и рис. 1Б). В северном сегменте этого океана по серии мелких зон спрединга (хребты Горда, Хуан-де-Фука, Эксплорер) также отмечается (табл. 3 и рис. 1Б) систематическое изменение с юга на север средних содержаний TiO₂, FeO*, MgO, K₂O, P₂O₅ [9]. Таким образом, региональные петрохимические тренды являются общей особенностью разноскоростных зон спрединга.

Наиболее отчетливо указанная особенность просматривается в более полно опробованном гребне Срединно-Атлантического хребта. Действительно, как в южном, так и северном секторах САХ фиксируются региональные линейные тренды (табл. 1), вид которых для отдельных компонентов ортогонален как для широтной координаты, так и по глубине для одних (TiO₂, CaO, K₂O) или имеется существенно различное значение ковариаций для других (SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅) (см. табл. 2). Существенно также то, что “структура” периодических функций распределения петрохимических компонентов (амплитуда колебаний, ширина волн и т.д.), имеющих между собой положительные коэффициенты парной линейной корреляции (Na₂O–K₂O; TiO₂–P₂O₅; Al₂O₃–CaO и

Таблица 2. Основные статистические величины для различных частей Срединно-Атлантического хребта

	САХ-Север								Экваториальная область				САХ-Юг	
	8°–38°		39°–51°		50°–64°		60°–73°		+1°–+1°		±8°		10°–23°	
	x	σ	x	σ	x	σ	x	σ	x	σ	x	σ	x	σ
SiO ₂	50.71	0.79	50.44	0.77	50.83	0.63	51.03	1.51	51.19	1.31	51.22	1.23	50.66	0.56
TiO ₂	1.39	0.32	1.38	0.24	<1.42	0.27	1.37	0.43	1.70	0.23	1.72	0.25	1.38	0.25
Al ₂ O ₃	15.37	0.71	<15.78	0.63	>14.30	0.72	14.41	0.89	15.48	0.71	15.42	0.70	15.34	0.41
FeO*	9.88	0.82	>9.03	0.89	<12.90	1.38	11.54	1.86	9.67	0.34	9.86	0.68	9.73	0.70
MgO	7.58	0.69	7.47	0.68	>7.07	0.65	6.70	1.52	6.74	0.87	6.73	0.89	8.00	0.39
CaO	11.73	0.70	>11.06	0.61	<11.38	0.50	>11.30	1.55	10.81	0.56	10.75	0.59	11.85	0.60
Na ₂ O	2.51	0.37	2.57	0.28	>2.17	0.25	>2.31	0.46	2.68	0.37	2.73	0.38	2.49	0.29
K ₂ O	0.155	0.13	<0.32	0.26	>0.111	0.03	<0.30	0.33	0.53	0.21	0.49	0.22	0.08	0.045
P ₂ O ₅	0.14	0.04	0.165	0.054	0.14	0.04	0.16	0.11	0.20	0.04	0.20	0.04	0.13	0.03
n	2003		309		650		63		79		92		41	
	САХ-Юг						Север САХ, общая выборка		Юг САХ, общая выборка		Разломные зоны-Север		Разломные зоны-Юг	
	24°–35°		35°–46°		53°–55°		8°–73°		10°–55°					
	x	σ	x	σ	x	σ	x	σ	x	σ	x	σ	x	σ
SiO ₂	<50.93	0.48	>50.73	0.54	50.50	0.62	50.73	0.80	>50.71	0.59	50.26	0.73	<51.08	0.68
TiO ₂	1.47	0.28	1.43	0.17	<1.95	0.49	1.39	0.33	<1.71	0.51	1.76	0.30	>1.56	0.30
Al ₂ O ₃	15.42	0.61	15.53	0.34	15.32	0.84	15.35	0.77	15.38	0.75	15.51	0.74	>15.13	0.41
FeO*	>9.55	0.68	9.61	0.33	<10.33	1.11	9.90	1.06	0.96	1.07	10.19	0.70	<10.26	0.71
MgO	7.70	0.76	7.83	0.54	>6.79	1.08	7.61	0.72	>7.26	1.45	7.20	0.63	>7.18	0.72
CaO	>11.65	0.65	>11.46	0.44	>10.75	0.83	11.72	0.69	>11.14	0.94	11.08	0.50	<11.34	0.61
Na ₂ O	<2.67	0.31	2.67	0.19	<3.15	0.32	2.50	0.36	<2.59	0.43	3.06	0.23	>2.55	0.33
K ₂ O	0.01	0.06	<0.144	0.07	<0.30	0.24	0.18	0.16	<0.226	0.23	0.20	0.14	<0.22	0.22
P ₂ O ₅	<0.144	0.035	<0.156	0.026	<0.22	0.086	0.145	0.047	<0.189	0.085	0.179	0.03	>0.155	0.04
n	160		91		368		2835		515		161		230	

др.), различна как в северном и южном секторах САХ, так и внутри их. Поэтому можно предположить, что функции распределения MORB содержат некоторые имманентные характеристики динамики развития магматических систем, которые не связаны с более локальными вариациями, а отражают какие-то общие характеристики динамики развития магматических систем под гребнями СОХ в разных секторах. При этом линейные тренды свидетельствуют о существовании широтных неоднородностей мантийного субстрата.

Масштаб рассматриваемых пространственных вариаций в функциях распределения отдельных петрогенных компонентов (SiO₂, Al₂O₃, CaO) больше размеров зон возможного влияния “плюмов”, “тройных точек” или крупных трансформных разломов. Действительно, базальты трансформ имеют фактически те же петрохимические характеристики, что и MORB в тех же сегментах СОХ, что следует из табл. 2. Отметим, что вид

спектральных характеристик “аномалии Буго” [3 и др.] практически аналогичен “обычным” сегментам северного сектора САХ, а в функциях распределения отдельных компонентов этой “аномалии” просто нет (рис. 1А). Для Срединно-Атлантического хребта из-за более последовательного опробования гребневой зоны, чем в СОХ Тихого или Индийского океанов, возможен предварительный анализ вида функций распределения петрогенных компонентов и глубин излияния лав (рис. 1А, табл. 1, 2). Видимо, следует согласиться с оценками [2] об отсутствии линейной связи между составом лав, скоростью спрединга и видом локального сегментирования СОХ, а также существованием каких-то иных связей колебаний состава выплавки и пространственных координат в СОХ [3]. Отмеченные выше характеристики функций распределения петрогенных компонентов соотносятся с заключением о существовании

Таблица 3. Ковариационная матрица линейных связей петрохимических компонентов и пространственных координат для Тихого и Индийского океанов (приведены только значимые коэффициенты)

Тихий океан ($n = 3167$)										
Переменные	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Широта
Al ₂ O ₃	-0.36									
FeO	-0.20	-0.76								
MgO	-0.64	0.71	-0.47							
CaO	-0.73	0.51	-0.27	0.90						
Na ₂ O	0.45	-0.14	-0.01	-0.70	-0.71					
K ₂ O	0.52		-0.21	-0.57	-0.69	0.76				
TiO ₂	-0.15	-0.65	0.85	-0.60	-0.40	0.36	0.09			
P ₂ O ₅	0.01	-0.23	0.37	-0.55	-0.48	0.59	0.58	0.61		
Широта	-0.06	0.06				0.04	0.12		0.08	
Долгота	0.18		-0.09	-0.08	-0.12		0.09	-0.08	-0.06	-0.40
Глубина (H)			-0.07	0.08	0.5	-0.09	-0.09	-0.06	-0.14	-0.40
Индийский океан ($n = 407$)										
Переменные	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Широта
Al ₂ O ₃	-0.24									
FeO*	-0.13	-0.83								
MgO	-0.34	0.53	-0.53							
CaO	-0.20	-0.20		0.42						
Na ₂ O		0.45	-0.32	-0.34	-0.82					
K ₂ O		0.20	-0.13	-0.43	-0.62	0.52				
TiO ₂		-0.32	0.40	-0.67	-0.62	0.54	0.43			
P ₂ O ₅				-0.52	-0.72	0.63	0.82	0.72		
Широта		-0.21	0.25		0.19	-0.41		-0.31	-0.25	
Глубина (H)	0.24	0.31	-0.33		-0.41	0.43	0.15		0.14	-0.11

неоднородностей состава в мантийном субстрате САХ по "изотопным характеристикам" [11 и др.].

Краткие выводы: 1) в функциях распределения содержаний петрогенных компонентов стекловатых MORB в области экватора присутствует специфический участок с аномально высокими дисперсиями, севернее и южнее которого их спектральные характеристики для ряда петрогенных компонентов различны; 2) имеются региональные, а в случае САХ и глобальный, линейные тренды некоторых петрогенных компонентов, свидетельствующие о неоднородностях в составе мантийного субстрата под гребнями СОХ в их северном и южном сегментах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ОИГГиМ СО РАН (ВМТК № 1753) и гранта РФФИ 00-05-65332.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges / Eds. J. Phipps Morgan et al. Wash. (D.C.): AGU, 1992. 612 p.

2. Niu Y., Batiza R. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № B13. P. 21753–21777.
 3. Дмитриев Л.В. // Петрология. 1998. Т. 6. № 4. С. 340–362.
 4. Bach W., Henger E., Erzinger J., Satir M. // Contribs Mineral. and Petrol. 1994. V. 116. P. 365–380.
 5. Reynolds J.R., Langmuir C.H. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № B7. P. 14915–14946.
 6. Machael P.J., Cornell W. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № B8. P. 18325–18356.
 7. Wendt J.I., Regelous M., Niu Y. et al. // Earth and Planet Sci. Lett. 1999. V. 173. P. 271–284.
 8. Parson L., Gracia E., Collier D. et al. // Earth and Planet Sci. Lett. 2000. V. 178. P. 231–251.
 9. Шаранов В.Н., Акимцев В.А., Доровский В.Н. и др. Динамика развития рудно-магматических систем зон спрединга. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ, 2000. 405 с.
 10. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.
 11. Тумаева Н.А. // Петрология. 2001. Т. 9. № 5. С. 504–518.