

УДК 552.11

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВАРИАЦИЙ СОСТАВА И Р-Т УСЛОВИЙ ЭВОЛЮЦИИ БАЗАЛЬТОВ СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТОВ И ИХ РЕГИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

© 2006 г. Л. В. Дмитриев*, С. Ю. Соколов**, А. А. Плечова*

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

119991 Москва, ул. Косыгина, 19, Россия;
e-mail: ldmitr@geokhi.ru; aplech@geokhi.ru

**Геологический институт РАН
119017 Москва, Пыжевский пер., 7, Россия;
e-mail: geophys@ginras.ru

Поступила в редакцию 20.01.2005 г.

Формальный статистический анализ вариаций состава базальтов для всей глобальной системы срединно-океанических хребтов (около 19000 составов закалочных стекол), включающий кластерный анализ, дискриминационный анализ, анализ гистограмм и ковариаций компонентов, позволил получить новые данные по петрологическим параметрам эволюции мантийного магматизма и по характеру проявления его продуктов в пространстве в зависимости от геодинамической обстановки. На основе полученных результатов стало возможным дать общую оценку степени петрологической изученности магматизма срединно-океанических хребтов и конкретизировать задачи дальнейших исследований. Получена информация, необходимая для разработки петрологической основы геодинамической модели магматизма шести основных групп базальтов (*P-T* условия эволюции, продуктивность вулканизма, мантийный апвеллинг, спрединг и др.).

Базальты срединно-океанических хребтов (MORB, BSOX или TOP¹) представляют продукты вулканической деятельности мантии океанических секторов Земли, вскрытые в виде потоков подушечных лав вдоль оси и флангов рифтовой зоны срединных хребтов. К настоящему времени накоплены и доступны обширные сведения по их петрографии, минералогии, петрохимии, петрологии, геохимии, связи с формированием геологических структур и др. Вместе с тем все еще остается большой круг вопросов, касающихся связи магматизма океанов с глубинным строением мантии и ее геодинамикой.

Вариации состава базальтов срединно-океанических хребтов отражают геодинамические особенности их генезиса, что имеет первостепенное значение для разработки проблемы происхождения и эволюции литосферы океанов. Исследования в этом направлении непрерывно ведутся с использованием данных петрологического эксперимента и материалов по геохимии изотопов и редких элементов. За последние годы были опубликованы работы, содержащие новую важную и разностороннюю информацию по данной проблеме и заслужившие мировое признание. Вместе

с тем по мере накопления фактического материала по составу базальтов с привязкой к геологическим структурам и к геофизическим полям и в связи с проблемой корреляции петрологических и геофизических параметров возникает необходимость уточнения ряда конкретных данных, установленных в ходе предшествующих исследований. В данном случае поставлена задача уточнить и упорядочить сведения по вариациям петрохимического состава базальтов всей мировой системы срединно-океанических хребтов, не касаясь широко известной информации по их петрографии и минералогии.

В одной из наших ранних работ была статистически обоснована классификация TOP северной части Срединно-Атлантического хребта (CAX) (Дмитриев и др., 1990). Основой фактического материала явился каталог Смитсонианского Института (Melson et al., 1977) по составу закалочных стекол TOP, дополненный данными текущих публикаций (всего 5882 микрозондовых анализа). Кластерный анализ этого материала позволил определить 6 групп TOP, отличающихся по вариациям состава и по петрологическим параметрам эволюции. Первые 4 группы (TOP-1, TOP-2, TOP-Na и TOP-K) представляют продукты дифференциации четырех разных родоначальных расплавов, образующихся в мантии на разной глубине при разных температуре и степени плавле-

¹ TOP – Толеиты Океанических Рифтов – термин, предложенный нами как альтернатива терминам BSOX или MORB (Дмитриев и др., 1978).

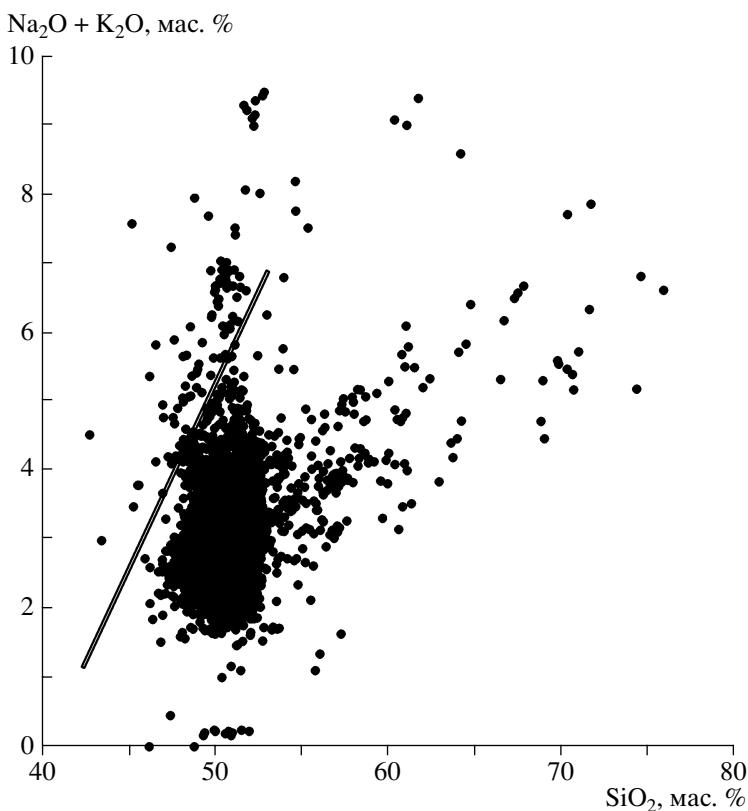


Рис. 1. Составы вулканических пород дна мирового океана в координатах SiO_2 –($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (McDonald, Katsura, 1962). Наклонная линия разделяет щелочные и толеитовые серии.

ния. TOP-1 и TOP-2 составляют фон всего вулканизма, занимая большую часть пространства срединных хребтов. Родоначальные расплавы TOP-1 образуются в мантии на большей глубине, при более высокой температуре и большей степени плавления по сравнению с TOP-2. Петрологические параметры эволюции TOP-1 и TOP-2 определены экспериментально. TOP-Na представляют продукты дифференциации расплавов, образующихся в мантии на небольшой глубине при минимальных значениях степени плавления, температуры и давления. Распространение TOP-Na ограниченно. Петрологические параметры эволюции TOP-Na были определены путем расчетов. TOP-K относится к продуктам наиболее глубинного мантийного магматизма в системе срединных океанических хребтов и по своей природе и свойствам является переходным к продуктам островного (OIB) магматизма. TOP-1 и TOP-K входят в состав пллюмовой ассоциации базальтов, а TOP-2 и TOP-Na – в состав спрединговой ассоциации. Было установлено, что Ti, Na и K являются элементами-индикаторами спрединговых и пллюмовых ассоциаций TOP: спрединговые ассоциации обогащены TiO_2 и Na_2O , а пллюмовые – K_2O . Остальные две группы – TOP-Fe и TOP-FeTi являются продуктами внутрикамерной дифференциации

TOP-1 и TOP-2 соответственно. Распределение этих шести групп в пространстве САХ было установлено статистически и показано на петрологической карте Атлантического океана (Дмитриев и др., 1990).

Позже по мере накопления фактического материала эти же 6 групп TOP были идентифицированы для Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП) и были изучены особенности их состава и характер распределения в пространстве. Идентификация групп проводилась без применения кластерного анализа, только по данным об их средних составах и стандартных отклонениях, рассчитанных ранее для северной части САХ. В ходе этого исследования была определена принадлежность групп к спрединговым и пллюмовым ассоциациям базальтов и установлена их связь с глубинным строением мантии и геодинамическими особенностями формирования срединных хребтов с разной скоростью спрединга (Дмитриев, 1998; Дмитриев и др., 1999, 2002; Дмитриев, Соколов, 2003).

Настоящая работа является продолжением этих исследований и включает детальное изучение корреляции геофизических и петрологических параметров формирования литосфера океанов с использованием современных баз данных.

В связи с этим представляется целесообразным уточнить вариации состава упомянутых шести групп ТОР для всего объема данных по океану в целом с использованием формальных статистических приемов.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Основой использованной здесь базы данных ГЕОХИ РАН по составу закалочных стекол ТОР всего Мирового океана являются новый Каталог Смитсонианского Института (Smithsonian..., 2000) и база петрологических данных Ламонтской геологической обсерватории (Ridge..., 1999). Этот материал дополнен оригинальными и новыми опубликованными данными. Всего в базу данных входит 18 793 микрозондовых анализа с суммой содержаний породообразующих элементов $100 \pm 1.5\%$, откалиброванных по стандарту M 111 240/52 (Jarosevich et al., 1979).

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ СОСТАВА И ПЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

На рис. 1 показаны вариации составов вулканических пород дна океана, вошедших в базу данных ГЕОХИ РАН, в координатах $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, все еще успешно используемых для упрощенной классификации магматических пород (McDonald, Katsura, 1962).

Согласно общепринятой номенклатуре, породы с содержанием $\text{SiO}_2 > 53$ мас. % относятся к средним и кислым породам. Их можно рассматривать как продукты глубокой дифференциации базальтов. Породы с содержанием $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) > 5$ мас. % относятся к субщелочным или щелочным базальтоидам, возможно продуктам внутриплитного магматизма. Первые представлены 476 анализами, что составляет 2.5% от всей базы данных. Эти породы распространены преимущественно в структурах, примыкающих к системе островных дуг и островов Тихого океана. В пределах САХ они редко встречаются в районах Исландии, Азорского плюма и о-ва Вознесения.

Породы с признаками повышенной щелочности представлены 238 анализами (1.3% от всего объема данных). Они изредка встречаются в районах, примыкающих к островам ложа Тихого океана, а также в районе Азорского плюма и вблизи Исландии. Эти породы ("кислые" и "субщелочные") здесь не рассматриваются.

Статистический анализ выполнен для толеитовых базальтов (ТОР), составы которых образуют компактное поле ("ядро") в координатах $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (рис. 1), и представлены 18 079 анализами.

Как упоминалось, ранее кластерным анализом по ограниченному числу данных (5882 анализа) было выделено 6 устойчивых групп ТОР. В настоящей работе будут представлены результаты кластерного анализа вариаций состава ТОР для всей системы срединно-океанических хребтов в полном объеме данных – 18 079 микрозондовых анализов закалочных стекол.

Процедура кластерного анализа выполнялась в несколько этапов с использованием вспомогательной информации, полученной по данным гистограмм и вариационных диаграмм для ключевых компонентов.

Кластеры рассчитывались для 5 вариантов набора аргументов, устойчиво определяющих максимальное различие между составами:

- 1) все 8 главных компонентов: $\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$;
- 2) 4 компонента с максимальной дисперсией содержания: $\text{TiO}_2-\text{FeO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$;
- 3) те же 4 компонента и отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{MgO}$ (степень плавления к степени дифференциации);
- 4) отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ (степень обогащения) – $\text{Na}_2\text{O}/\text{MgO}$ (степень плавления к степени дифференциации) – FeO/MgO (коэффициент железистости);
- 5) 3 компонента с максимальной дисперсией $\text{TiO}_2-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ и отношений $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ и $\text{Na}_2\text{O}/\text{MgO}$.

Каждый набор аргументов обрабатывался по методике кластерного анализа в программной среде STATISTICA с предварительной стандартизацией значений переменных (приведение к нулевому среднему и единичной дисперсии). Таблица данных, в которой строки соответствуют единичным анализам, а колонки аргументам, загружалась в STATISTICA, где проводился расчет разделения всего множества анализов на подгруппы по методу К-средних. Суть этого метода заключается в оконтуривании изолированных подмножеств в n -мерном пространстве, где n – число аргументов. Этот процесс происходит следующим образом. Алгоритм классификации задается некоторым начальным радиусом r в безразмерных (вследствие стандартизации) координатах, малым настолько, чтобы сферы радиуса r , проведенные вокруг каждой точки, не пересекались. Дальнейший процесс происходит следующим образом. При увеличении радиуса элементарные сферы начинают объединяться в некоторые области разного объема, оконтуривающие подмножества данных. Процесс останавливается, когда число подмножеств оказывается равным заданному числу желаемых кластеров. На выходе процедуры имеются координаты центров кластерных подмножеств, их средних радиусов и таблица принадлежности каждого анализа к тому или иному номеру кластера. Теоретически данная процеду-

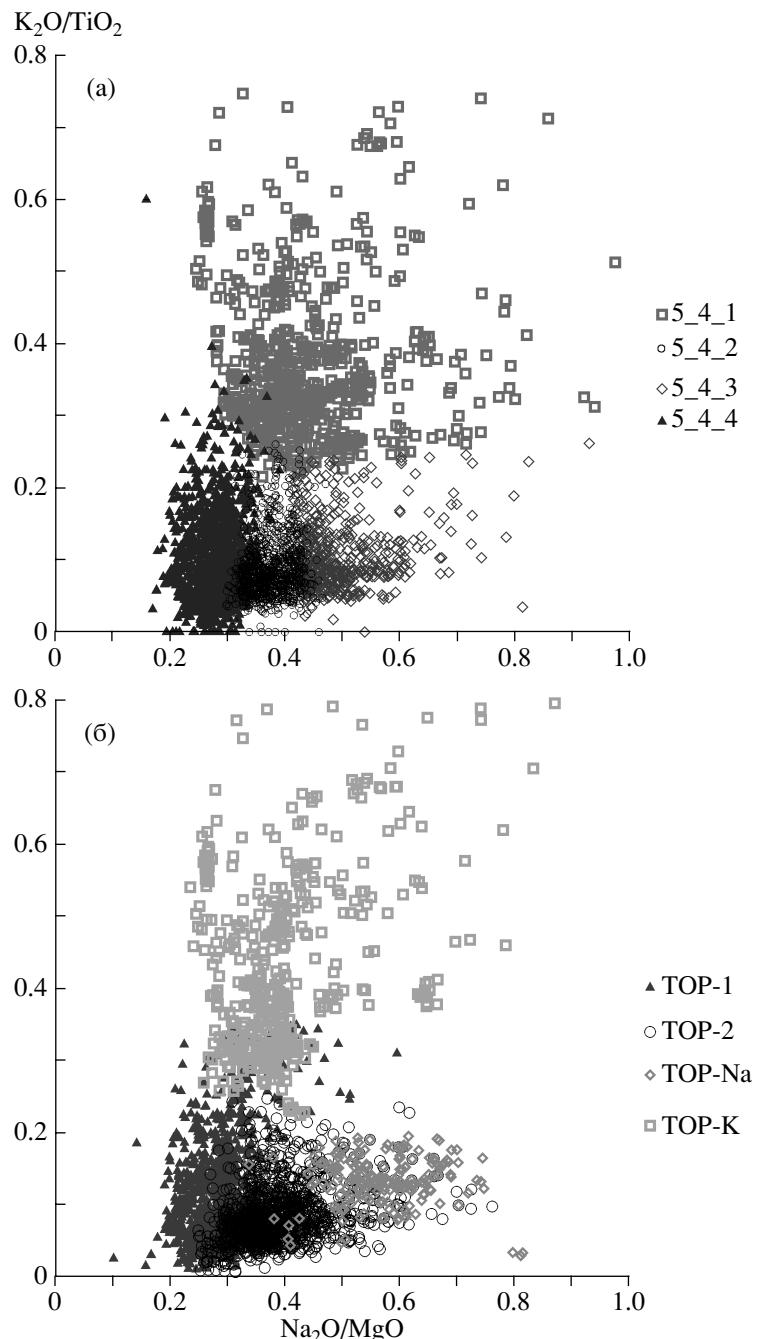


Рис. 2. Сравнение конфигурации полей составов ТОР, рассчитанных в работе (Дмитриев, Соколов, 2003) (а) и в настоящем исследовании (б).

Сравниваемые поля выделены одинаковыми символами.

ра может быть исполнена в обратном порядке изменения радиуса начальной сферы – от начально- го большого значения r , охватывающего все точки, в сторону уменьшения. При этом начальная гиперсфера будет дробиться на более мелкие об- ласти до достижения желаемого числа кластеров. Процесс расчета в среде STATISTICA содержит

также особенности технологического порядка, которые в данной статье не обсуждаются.

Наиболее важным в методике расчета является вопрос о том, какое число кластеров, на которые предстоит расклассифицировать множество анализов, является правильным. Это число опре- деляется исследователями исключительно на ос-

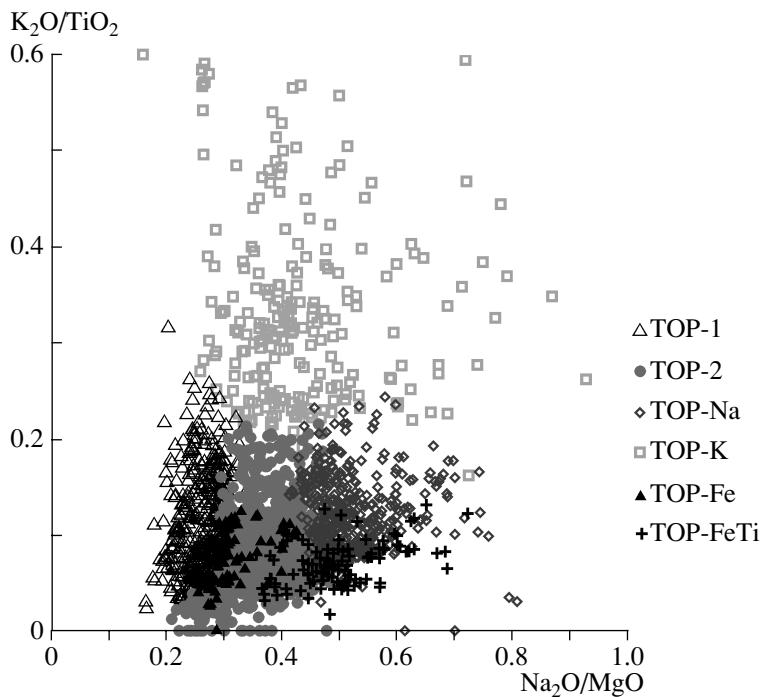


Рис. 3. Составы ТОР Мирового океана в координатах $\text{Na}_2\text{O}/\text{MgO}$ – $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ по данным кластерного анализа (аргументы TiO_2 – Na_2O – K_2O – $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ – $\text{Na}_2\text{O}/\text{MgO}$) с учетом данных гистограмм (см. текст).

новании физической целесообразности существования получаемой классификации. Для определения оптимального числа кластеров необходимо выполнить несколько итераций (шагов) расчетов, постепенно увеличивая число конечных кластеров от заведомо минимального (например 2) до заведомо превосходящего физически реализуемое и инструментально различимое разнообразие групп. Оптимальное число кластеров будет находиться где-то посередине, и определять его можно по следующим асимптотическим критериям. Допустим, выполнены расчеты кластеров с разделением множества анализов с шагом от 2 до 10 кластеров. Поскольку два целевых кластера явно не описывают всего многообразия групп, переходим к следующему шагу – 3 кластера. Как правило, при этом выделяется новая группа с заметно отличающимися параметрами, и так далее. Если же по мере наращивания числа кластеров с каждым новым шагом расчетов мы пересекаем физически обоснованный оптимум и устремляем число кластеров в бесконечность (к числу исходных анализов), то в результате расчетов появляются кластеры, практически ничем не отличающиеся друг от друга, с параметрами, колеблющимися относительно средних кластерных значений. Эта увеличивающаяся концентрация параметров кластеров в пределах некоторого малого числа относительно средних значений говорит о том, что мы прошли оптимум при выполнении шагов расчетов и заставляем алгоритм проводить классифи-

кацию там, где это уже нецелесообразно. Таким образом, оптимальным числом кластеров является значение, при котором перестают образовываться устойчиво отличающиеся друг от друга группы и параметры кластеров начинают “роиться” около средних значений в пределах, соизмеримых с инструментальной точностью.

Все варианты начиная с 4-го шага (по 4 кластера) обнаружили сходство группировок по вариациям составов между собой и с полями составов ТОР-1, ТОР-2, ТОР-На и ТОР-К, установленными ранее². Их отличие выражалось лишь в величинах смещения границ между полями составов и зон их перекрытия. Максимальное сходство полей составов ТОР с полями, установленными в данных расчетах, соответствует 4-му шагу 5-го варианта набора компонентов (3 компонента с максимальной дисперсией TiO_2 – Na_2O – K_2O и отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ и $\text{Na}_2\text{O}/\text{MgO}$). Это хорошо видно на рис. 2, где в координатах $\text{Na}_2\text{O}/\text{MgO}$ – $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ показаны поля составов ТОР, определенные при расчете кластеров 5-го варианта (рис. 2а), и соответствующие им поля, установленные в ходе предыдущих исследований (рис. 2б) (Дмитриев, Соколов, 2003). Отметим, что ни один из вариантов кластерного анализа не позволил выделить поля составов, соответствующих ТОР-Fe и ТОР-FeTi. Это

² На 5-ом, 6-ом и 7-ом шагах расчета появляются поля составов, перекрывающие друг друга на большой площади.

Таблица 1. Средние составы в мас. % (X) и стандартное отклонение (σ) базальтов срединно-океанических хребтов, плюмовой ассоциации, спрединговой ассоциации

Компо-ненты	Базальты СОХ		Плюмовая ассоциация						Спрединговая ассоциация					
			TOP-1		TOP-K		TOP-Fe		TOP-2		TOP-Na		TOP-Fe(Ti)	
	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ
Данные настоящей работы														
SiO ₂	50.85	0.80	50.80	0.86	51.18	1.10	51.07	0.57	50.78	0.70	51.15	0.77	50.93	0.76
TiO ₂	1.54	0.42	1.08	0.18	1.68	0.46	1.36	0.19	1.57	0.28	2.11	0.26	2.41	0.46
Al ₂ O ₃	15.20	1.00	15.52	0.78	15.83	1.09	14.15	0.41	15.20	0.88	14.85	0.92	13.21	0.64
FeO	10.25	1.42	9.53	0.77	9.44	1.31	12.33	0.42	10.22	1.07	11.01	1.28	14.20	1.17
MgO	7.50	0.88	8.29	0.69	6.98	0.92	7.07	0.39	7.57	0.64	6.48	0.50	5.77	0.54
CaO	11.65	0.79	12.39	0.51	11.20	1.01	11.76	0.38	11.66	0.55	10.64	0.67	10.35	0.63
Na ₂ O	2.66	0.41	2.18	0.19	2.89	0.48	2.06	0.12	2.74	0.26	3.33	0.31	2.75	0.36
K ₂ O	0.18	0.16	0.12	0.06	0.56	0.24	0.11	0.05	0.13	0.06	0.24	0.07	0.18	0.06
K ₂ O/TiO ₂	0.11	0.09	0.11	0.05	0.33	0.11	0.08	0.03	0.08	0.04	0.12	0.04	0.07	0.03
<i>N</i>	18079		3648		1941.0		428		10346		1002.0		714	
%	100		20.18		10.74		2.37		57.22		5.54		3.95	
По данным (Дмитриев, Соколов, 2003)														
SiO ₂	50.86	0.81	50.97	0.94	50.28	1.09	53.36	3.03	50.80	0.72	50.67	0.83	52.68	3.21
TiO ₂	1.54	0.43	1.28	0.35	1.57	0.32	1.96	0.58	1.69	0.40	1.61	0.23	2.84	0.67
Al ₂ O ₃	15.21	1.01	15.23	1.01	16.38	0.79	13.38	1.26	15.20	1.02	16.14	0.84	12.83	1.75
FeO	10.26	1.43	10.17	1.47	8.60	1.34	13.91	2.15	10.31	1.41	9.22	0.81	14.78	2.27
MgO	7.50	0.89	7.72	0.95	7.69	0.57	3.57	1.16	7.38	0.84	7.65	0.48	4.22	1.12
CaO	11.65	0.82	12.02	0.85	11.73	1.59	8.16	1.18	11.45	0.73	11.00	0.83	8.71	1.20
Na ₂ O	2.66	0.42	2.28	0.32	2.64	0.48	2.85	0.37	2.86	0.32	3.40	0.20	3.22	0.54
K ₂ O	0.19	0.20	0.22	0.28	0.87	0.53	0.49	0.26	0.17	0.14	0.18	0.06	0.38	0.26
K ₂ O/TiO ₂	0.12	0.13	0.16	0.19	0.57	0.40	0.28	0.20	0.10	0.07	0.11	0.04	0.60	0.09
<i>N</i>	17812		5812		216		184		10834		325		441	
%	100		32.6		1.21		1.03		60.82		1.82		2.47	

Примечание. *N* – число анализов в каждой группе и их доля в % от всего объема данных.

можно объяснить тем, что обе эти группы занимают сравнительно небольшой объем, являясь при этом продуктами дифференциации TOP-1 и TOP-2. В ходе предыдущих исследований к железистым базальтам были отнесены составы с содержанием FeO более 12 мас. %, а разделение их на TOP-Fe и TOP-FeTi было выполнено при анализе ряда вариационных диаграмм (Дмитриев, Соколов, 2003).

При общем сходстве конфигурации полей на диаграммах рис. 2а и 2б видны также их различия. Это можно объяснить тем, что ранее кластерный анализ использовался только для северной части

САХ, а не для всего океана. В данном исследовании в целях уточнения устойчивых вариаций составов TOP-1, TOP-2, TOP-Na и TOP-K, а также для определения полей составов TOP-Fe и TOP-FeTi были изучены и использованы данные гистограмм FeO, Na₂O, K₂O и K₂O/TiO₂ для всего объема базы данных и для каждого из четырех кластеров 5-го варианта.

Значимые минимумы содержаний K₂O (0.25 мас. %) и отношения K₂O/TiO₂ (0.2–0.3) были установлены для всех кластеров. Это дало основание заметно увеличить поле составов, отве-

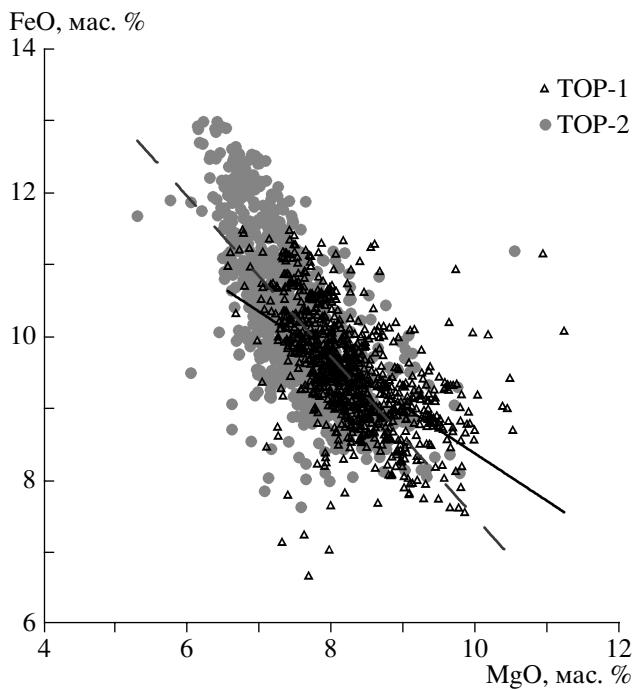


Рис. 4. Поля составов ТОР-1 и ТОР-2 в координатах MgO–FeO.

Разный наклон трендов дифференциации ТОР-1 и ТОР-2 может служить признаком того, что обе группы имеют разные мантийные источники расплавов. Более пологий наклон линии тренда дифференциации ТОР-1 (сплошная линия) к оси MgO по сравнению с трендом ТОР-2 (пунктирная линия) свидетельствует об относительно повышенной магнезиальности родоначальных расплавов ТОР-1.

чающих кластеру 5–4–1, соответствующему ТОР-K, за счет остальных полей.

Слабо выраженный минимум Na₂O 2.5–3 мас. % заметен на гистограмме всей базы данных. Ему соответствует разрыв составов на уровне содержания Na₂O 2.8 мас. % на диаграмме MgO–Na₂O для кластера 5–4–3, отвечающего ТОР-Na.

На гистограмме Na₂O в этом кластере также заметен слабый минимум при содержании Na₂O 2.8 мас. %. Это дало основание исключить составы с содержанием Na₂O < 2.8 мас. % из кластера, соответствующего ТОР-Na.

Два заметных минимума содержаний FeO (11.5 и 13 мас. %) видны на гистограмме для всей базы данных. Минимум 11.5 мас. % хорошо виден на гистограмме кластера 5–4–4, соответствующей ТОР-1, а минимум 13 мас. % – на гистограмме 5–4–2, соответствующей ТОР-2. Это дало основание вычесть из всех кластеров составы с содержанием FeO > 13 мас. %, которые были объединены

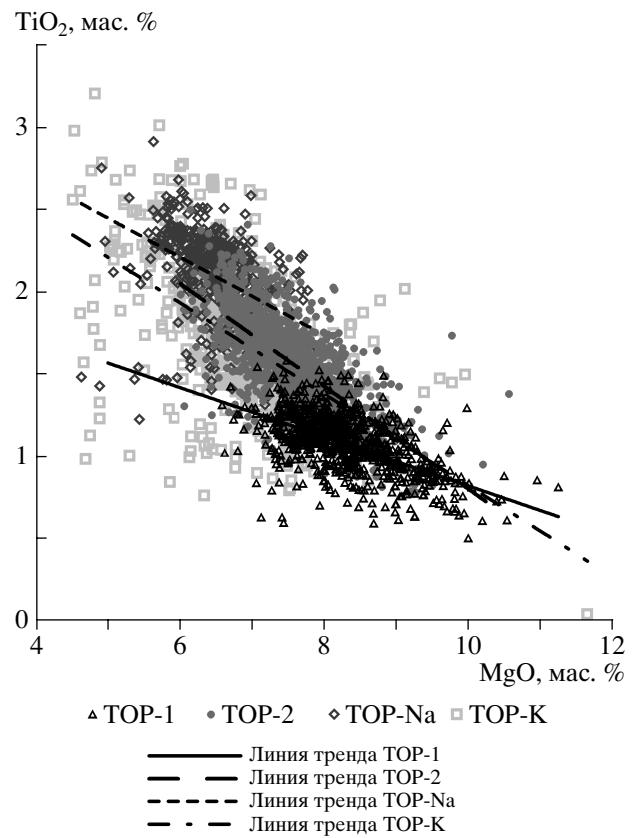


Рис. 5. Положение полей составов и трендов дифференциации ТОР-1, ТОР-2, ТОР-Na и ТОР-K в координатах MgO–TiO₂.

Разный наклон трендов и разные уровни содержаний TiO₂ подчеркивают роль TiO₂ как индикатора плюмовых и спрединговых ассоциаций базальтов (см. текст).

в группу ТОР-FeTi. Составы с содержанием FeO > 11.5 мас. % были объединены в группу ТОР-Fe.

Составы кластеров 5–4–4 и 5–4–2 после вычитания из них составов, соответствующих ТОР-Fe и ТОР-FeTi, а также составов с содержанием K₂O > 0.25 мас. % и Na₂O > 2.8 мас. % можно представить в качестве ТОР-1 и ТОР-2 соответственно.

На рис. 3 показана диаграмма в координатах Na₂O/MgO–K₂O/TiO₂ для составов всех шести групп ТОР, рассчитанных в ходе описанной процедуры. Диаграмма может быть использована для идентификации разных групп ТОР по материалу из текущих поступлений.

В табл. 1 суммированы все сведения о средних составах и стандартных отклонениях для всего объема данных по Мировому океану и для всех групп ТОР, полученные в настоящем исследовании. Здесь же для сравнения приведены данные, опубликованные в (Дмитриев, Соколов, 2003).

Анализ табл. 1 показывает следующее.

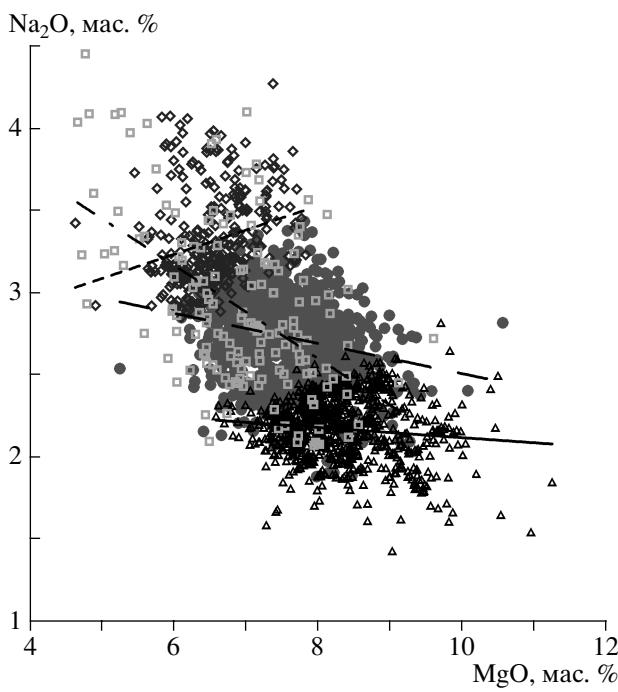


Рис. 6. Положение полей составов и трендов дифференциации TOP-1, TOP-2, TOP-Na и TOP-K в координатах MgO - Na_2O .

Разный наклон трендов и разные уровни содержаний Na_2O подчеркивают роль Na_2O как индикатора плюмовых и спрединговых ассоциаций базальтов (см. текст). Условные обозначения см. рис. 5.

После опубликования работы (Дмитриев, Соколов, 2003) банк был дополнен выборкой, включающей всего 267 анализов, поэтому средний состав базальтов Мирового океана остался практически неизменным.

Почти не изменилось соотношение плюмовых и спрединговых ассоциаций базальтов: 32% к 68% на 2003 г. и 33% к 67% по новым расчетам.

Заметные изменения произошли за счет перераспределения долей разных групп TOP.

В плюмовой ассоциации уменьшилась доля TOP-1 (20% против 33%) за счет увеличения доли TOP-K (11% вместо 1%). Доля TOP-Fe увеличилась в 2 раза (2% вместо 1%).

В спрединговой ассоциации уменьшилась доля TOP-2 (57% вместо 61%). Заметно увеличились доли TOP-Na и TOP-FeTi (5% вместо 2% и 4% вместо 2%).

Произошли некоторые изменения и в средних составах разных групп TOP. Наиболее заметные из них – увеличение магнезиальности TOP-1, TOP-Fe и TOP-FeTi, содержаний Na_2O и TiO_2 в TOP-K и TOP-Na и уменьшение содержаний Na_2O и TiO_2 в TOP-1, TOP-Fe и TOP-FeTi. В среднем составе TOP-Na несколько возросло содержание

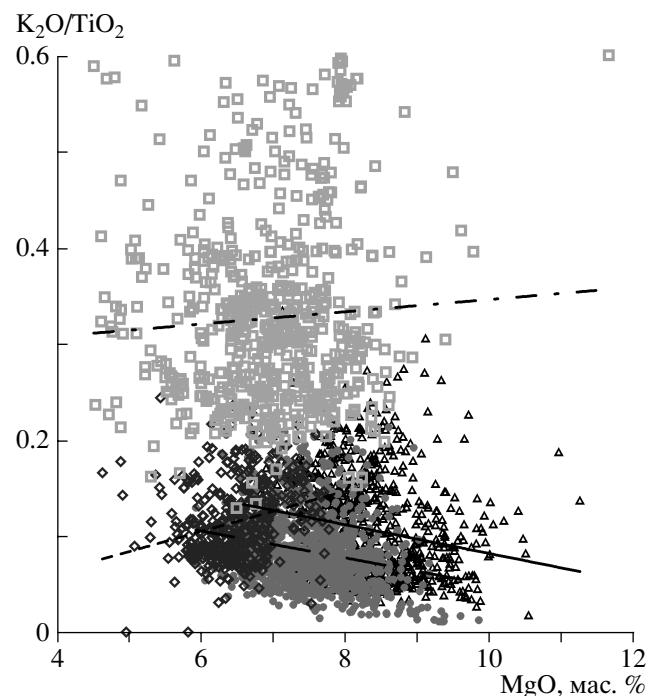


Рис. 7. Положение полей составов и трендов дифференциации TOP-1, TOP-2, TOP-Na и TOP-K в координатах MgO - K_2O/TiO_2 .

Разный наклон трендов и разные уровни отношения K_2O/TiO_2 показывают разную степень обогащения данных групп TOP и свидетельствуют об их разных мантийных источниках (см. текст). Условные обозначения см. рис. 5.

TiO_2 , FeO и K_2O . Средний состав TOP-2 практически не изменился.

Причина этих изменений объясняется тем, что применение кластерного анализа по ключевым компонентам для всего объема данных (18 079 анализов вместо 5882) позволило более корректно определить вариации состава базальтов, особенности их дифференциации и принадлежность их к той или другой группе. На изменения вариаций состава повлияли также и региональные особенности распределения разных групп TOP. Вариации состава разных групп TOP иллюстрируются рядом графиков, показанных ниже (для “разгрузки” графиков символы наносились с разными интервалами (с шагом от 1 до 30 в зависимости от объема той или другой группы составов).

На диаграмме MgO - FeO (рис. 4) видно, что составы наиболее распространенных групп TOP-1 и TOP-2 имеют разное положение и разный наклон трендов их фракционирования. Это наглядно подтверждает сделанный ранее основной вывод о том, что продукты дифференциации обеих групп имеют разный источник в мантии: TOP-1 более глубинный и более высокотемпературный (магнезиальный) по сравнению с TOP-2.

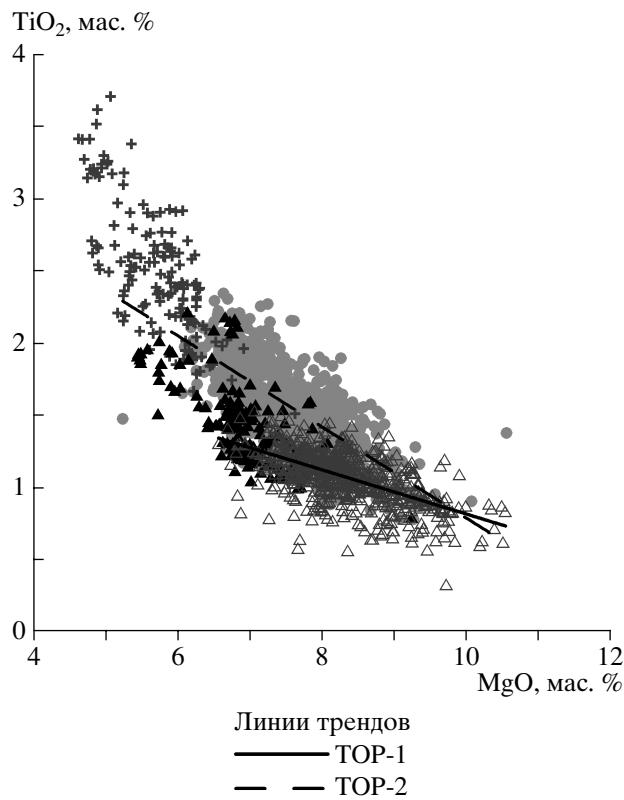


Рис. 8. Положение полей составов и трендов дифференциации TOP-1, TOP-2, TOP-Fe и TOP-FeTi в координатах MgO– TiO_2 .

Диаграмма подчеркивает генетическое родство TOP-Fe с TOP-1 и TOP-FeTi с TOP-2. Условные обозначения см. рис. 3.

Рис. 5, 6 и 7 показывают различия в трендах фракционирования индикаторных элементов TiO_2 , Na_2O и степени обогащения $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ для главных групп TOP-1, TOP-2, TOP-Na и TOP-K. Хорошо видно, что содержание TiO_2 при дифференциации TOP-2 и TOP-Na возрастает быстрее, чем для TOP-1 (рис. 5), что объясняет повышенное содержание TiO_2 в базальтах спрединговой ассоциации. Рис. 6 наглядно иллюстрирует два уровня содержания Na_2O в основных группах TOP-1 и TOP-2: самое высокое в TOP-Na и возможное уменьшение при фракционировании TOP-Na.

Это однозначно свидетельствует о том, что мантийный источник базальтов спрединговой ассоциации обогащен Na_2O относительно базальтов плюмовой ассоциации. На рис. 7 видны параллельные тренды обогащения для TOP-1 и TOP-2, причем тренд для TOP-1 расположен выше, чем для TOP-2. Близкое расположение трендов объясняет сходство величины отношения $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ для средних составов обеих групп и подтверждает сделанный ранее вывод о том, что родоначальные расплавы TOP-1 (плюмовая ассоциация) яв-

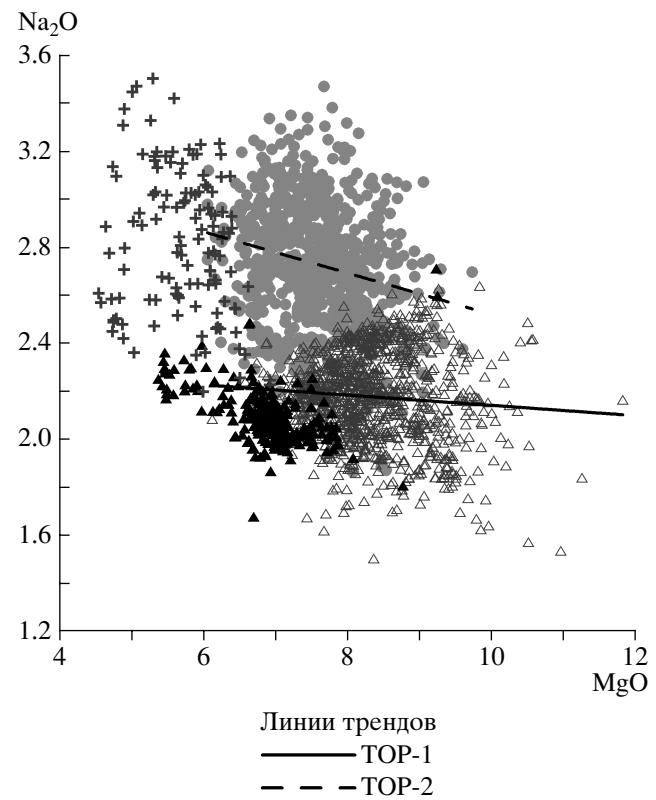


Рис. 9. Положение полей составов и трендов дифференциации TOP-1, TOP-2, TOP-Fe и TOP-FeTi в координатах MgO– Na_2O .

Диаграмма подчеркивает генетическое родство TOP-Fe с TOP-1 и TOP-FeTi с TOP-2. Условные обозначения см. рис. 3.

ляются более обогащенными по сравнению с TOP-2 (спрединговая ассоциация).

Поведение Na_2O и TiO_2 при дифференциации TOP-K такое же, как для остальных главных групп. В то же время рис. 5, 6 и 7 демонстрируют резко повышенное содержание K_2O и высокое значение степени обогащения в TOP-K. Тренды фракционирования для этой группы мало информативны из-за широких вариаций ее состава (рис. 3). В целом вариации состава группы TOP-K свидетельствуют о ней как о независимой группе. В наших предшествующих работах показано, что TOP-K принадлежит к плюмовой ассоциации и по петрологическим параметрам является наиболее контрастным по отношению к TOP-Na.

В (Дмитриев, 1998) TOP-Fe и TOP-FeTi отнесены к продуктам глубокого фракционирования TOP-1 и TOP-2 соответственно в магматических камерах при относительно низком (менее 3 кбар) давлении. В результате кластерного анализа удалось на количественной основе показать генетическое родство TOP-Fe с TOP-1 в плюмовой ассоциации и TOP-FeTi с TOP-2 в спрединговой ассоциации. Это наглядно отражено на рис. 8 и 9:

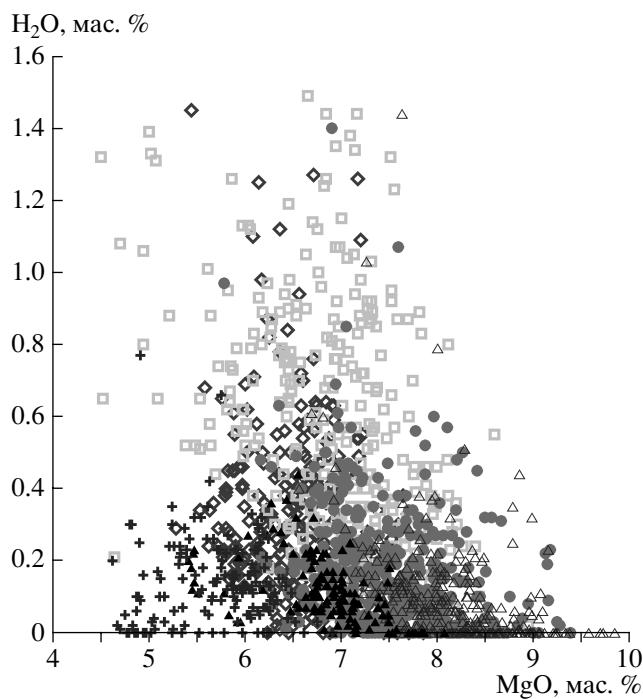


Рис. 10. Поля составов главных групп ТОР в координатах MgO – H_2O . Содержание H_2O рассчитано по методике Л.В. Данюшевского с ошибкой $\pm 0.5\%$ (Danyushhevsky et al., 1996). Объяснение см. текст. Условные обозначения см. рис. 3.

составы ТОР-Fe по данным об изменении содержаний индикаторных элементов TiO_2 и Na_2O лежат на продолжении тренда дифференциации ТОР-1, а составы ТОР-FeTi на продолжении тренда ТОР-2.

В ходе предыдущих исследований нами были рассчитаны значения давления, температуры и содержания H_2O для тройной котектики ТОР ($Ol-Pl-Cpx$) по методике, описанной в (Дмитриев и др., 1994) и реализованной позже в виде специальной опции программы PETROLOG (Danyushhevsky et al., 1996). Метод оценки давления при кристаллизации ТОР основан на эффекте расширения поля стабильности клинопироксена при повышении давления. Для решения этой задачи проводится серия полигарических расчетов, моделирующих температуры кристаллизации оливина, плагиоклаза и клинопироксена при разных давлениях. Условия равенства расчетных температур для составов закалочных стекол обеспечивают критерий оценки давления в области стабильности данной ассоциации минералов. При оценке содержания воды использован известный эффект значительного снижения температуры ликвидуса плагиоклаза относительно оливина и клинопироксена. Накопленные обширные данные по петрографии и петрохимии ТОР показывают, что при содержании $MgO > 9$ мас. % крис-

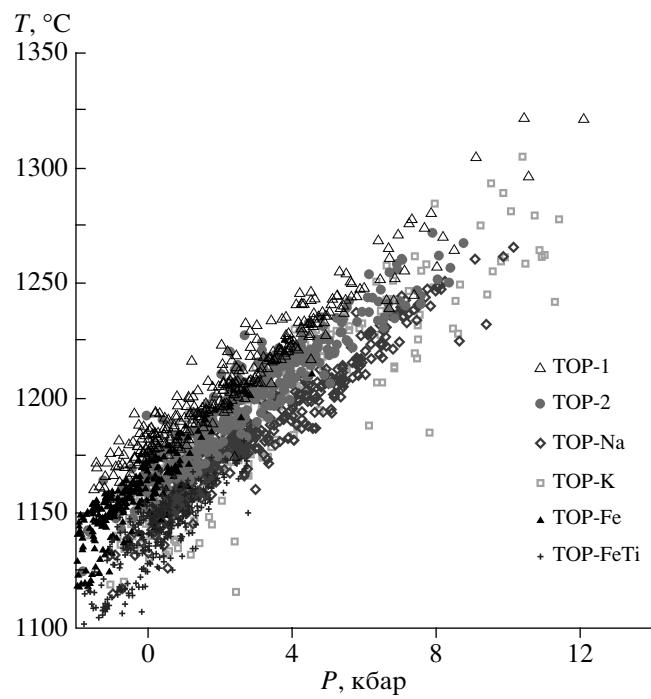


Рис. 11. Поля составов 6 групп ТОР в P – T координатах.

Параметры рассчитаны по программе Л.В. Данюшевского (Danyushhevsky et al., 1996) с ошибкой $P \pm 2$ кбар; $T \pm 10^\circ\text{C}$.

таллизация начинается с оливина, а устойчивая трехминеральная ассоциация $Ol-Pl-Cpx$ появляется при понижении содержания MgO до 8.5 мас. % и менее. Это позволяет использовать данный метод вне зависимости от того, в каких условиях происходила кристаллизация – изобарических или полигарических.

На основе этих расчетов оценены основные тенденции в распределении составов разных групп ТОР в P – T координатах и установлены пределы содержания воды в соответствующих расплавах при дифференциации.

Ниже приводятся результаты аналогичных расчетов по модернизированной программе Л.В. Данюшевского PETROLOG 2 (Danyushhevsky, 2001), которые позволили значительно уточнить положение полей составов всех групп ТОР в P – T координатах. Погрешность оценки давления по этой методике составляет ± 2 кбар, а значения температуры не выходят за пределы точности использованных геотермометров (5 – 10°C). При этом содержание воды в расплаве можно оценить с точностью примерно 50% от рассчитанного содержания.

На рис. 10 показаны результаты расчета содержания воды для всех групп ТОР в координатах MgO – H_2O . Отметим, что эти расчетные значения содержаний воды в ТОР не противоречат данным

Таблица 2. Составы наиболее магнезиальных разностей ТОР и их параметры для расчета трендов дифференциации

Компо-ненты	Плюмовая ассоциация			Спрединговая ассоциация		
	TOP-1	TOP-K	TOP-Fe	TOP-2	TOP-Na	TOP-FeTi
SiO ₂	49.2	49.9	50.9	50.1	51.5	51.0
TiO ₂	0.7	1.2	1.2	1.2	1.6	2.0
Al ₂ O ₃	17.7	17.5	15.0	17.2	16.2	13.5
FeO	7.5	8.0	11.5	8.7	9.5	13.0
MgO	11.0	9.0	7.7	8.7	7.5	6.9
CaO	11.8	11.5	11.5	11.4	10.2	10.7
Na ₂ O	2.0	2.5	2.1	2.6	3.3	2.8
K ₂ O	0.1	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1
P	10	10	2	8	7	2
H ₂ O	0.1	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2
dP/dF	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1
T	1300 Ol	1250 Ol + Pl	1190 Ol + Pl	1260 Pl	1200 Ol + Pl	1180 Ol
T	1280 Ol + Pl		1150 Ol + Pl + Aug	1240 Pl + Ol		1160 Ol + Pl + Aug
T _{котект}	1160 Ol + Pl + Au	1140 Ol + Pl + Aug	1120 Pig + Pl + Aug	1150 Pl + Ol + Aug	1140 Ol + Pl + Aug	1080 Ol + Pl + Aug + Mt

Примечания. Содержания элементов в мас. %. dP/dF – степень фракционирования, кбар/мол. T, °C – изменение температуры в ходе кристаллизации и при смене парагенезисов.

Ol – оливин, Pl – плагиоклаз, Aug – авгит, Mt – магнетит, Pig – пижонит.

прямых определений воды в MORB разного состава (Коваленко и др., 2004; Asimov, Langmuir, 2003; Соболев, 1997). Далее эти данные будут использованы для расчета трендов дифференциации ТОР разных групп.

На рис. 11 показаны поля составов шести групп ТОР в P-T координатах. Здесь отчетливо видно разделение общего поля на “слои”, расположенные параллельно линии сухого солидуса по (Herzberg, 1996) и соответствующие разным груп-

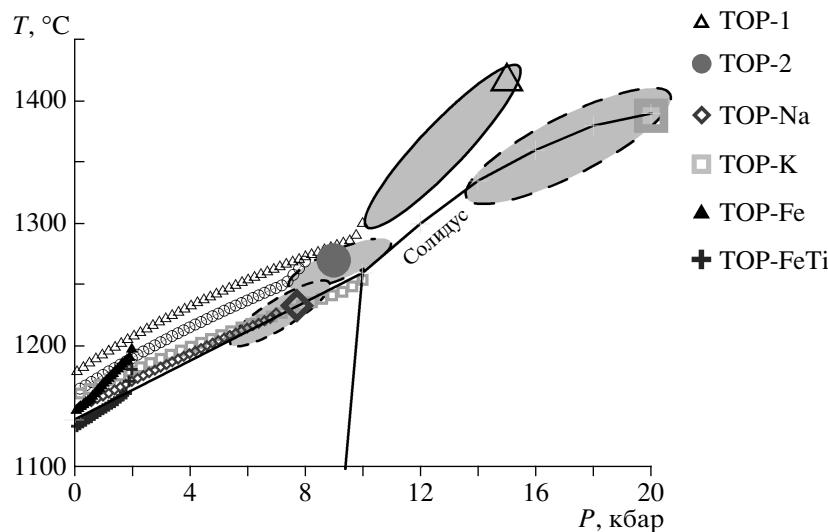


Рис. 12. Тренды фракционной кристаллизации 6 групп базальтов мировой системы срединно-океанических хребтов (ТОР), рассчитанные по программе КОМАГМАТ 3.5 (Ariskin, 1999) и поля P-T условий формирования исходных расплавов.

Положение линии “сухого” солидуса нанесено по (Herzberg, Zhang, 1996). Объяснение см. в тексте.

Таблица 3. Составы (мас. %) родоначальных расплавов ТОР по данным исследования расплавных включений и расчетного моделирования

Компоненты	TOP-1 (Sobolev, Dmitriev, 1989)	TOP-2 (Sobolev, Dmitriev, 1989)	TOP-K (Гуренко и др., 1999)
SiO ₂	48.9	49.6	46.5
TiO ₂	0.5	0.9	2.1
Al ₂ O ₃	15.7	18.6	13.9
FeO	7.7	7.2	8.7
MgO	13.9	9.4	12.6
CaO	11.8	12.0	12.5
Na ₂ O	1.5	2.3	2.2
K ₂ O	0.0	0.0	0.8
K ₂ O/TiO ₂			0.38
P к бар	15	9	20
T, °C	1420	1270	1388

пам ТОР. “Слои” не пересекаются, что может быть прямым свидетельством существования разных источников у каждой группы ТОР и их независимой эволюции по параллельным трендам. Зоны перекрытия полей составов незначительны, что может служить признаком устойчивости независимого процесса эволюции расплавов, происходящих из разных источников. Хорошо видно, что группа TOP-1 представляет продукты дифференциации расплавов, образующихся при наиболее высоких значениях температуры и давления, а группа TOP-Na при наиболее низких. Базальты группы TOP-2 занимают промежуточное положение по этим параметрам. Группа TOP-K характеризуется максимальной дисперсией P-T параметров, а составы, расположенные в области повышенного давления, смещены в область умеренной температуры. Последнее может быть следствием повышенного содержания воды в источнике этих расплавов. Группа TOP-Fe продолжает тренд

TOP-1 с некоторым смещением в область более низких значений температуры и давления, а TOP-FeTi заканчивают тренд дифференциации TOP-2, также со смещением в область наиболее низких значений этих параметров.

Средние тренды дифференциации для каждой из групп ТОР, подчеркивающие характер их эволюции в P-T координатах, были рассчитаны по модернизированной программе КОМАГМАТ 3.5 (Ariskin, Barmina, 2004). Для выполнения этой процедуры для каждой из групп ТОР по данным о положении полей их составов в координатах “MgO – один из петрогенных элементов” были рассчитаны средние составы наиболее магнезиальных разностей (начальные точки отсчета трендов). Величина начального давления задавалась по положению этих составов в P-T координатах (рис. 11). Условия дифференциации были определены путем подбора параметров, при которых по визуальной оценке положение вычисляемого тренда хорошо совпадало с положением полей составов в координатах “MgO – любой петрогенный элемент”. На данном этапе исследования не было необходимости расчета специальной функции, отражающей отклонение реальных составов от линии тренда, так как величина этого отклонения оказалась меньше, чем интервал перекрытия полей составов разных групп ТОР. Содержание H₂O в каждой группе приближенно оценивалось по данным рис. 10 (см. выше). В результате подбора было установлено, что существующие вариации составов ТОР наиболее удовлетворительно соответствуют модели фракционной кристаллизации с шагом dP/dF (кбар/мол. %) 0.1–0.4 в открытой системе в ходе декомпрессии при буфере QFM. Тренд дифференциации для TOP-K рассчитывался при начальном давлении 10 кбар, так как при большем давлении программа КОМАГМАТ 3.5 допускает ошибки при расчете. Все перечисленные параметры, а также вычисленные значения температуры от начала кристаллизации до котектики сведены в табл. 2 (для TOP-K эти параметры рассчитаны для интервала 0–10 кбар, см. выше).

Таблица 4. Плотность опробования системы срединно-океанических хребтов (оценочно)

Регион	Длина, км	Число анализов	Число анализов/км
Тихий океан, хребет Хуан де Фука, сегмент ВТП от 56° ю.ш. до 25° с.ш.	11500	6273	0.5
Галапagosский центр спрединга	2350	1249	0.5
Северная Атлантика, сегмент САХ от 0 до 80° с.ш.	10200	6053	0.6
Южная Атлантика, сегмент САХ от 0 до 60° ю.ш. и Американо-Антарктический хребет	8100	1735	0.2
Индийский океан: Красное море, Срединно-Индийский хребет, Юго-Западный Индийский хребет, Австралио-Антарктическое поднятие	13100	552	0.04
Океан в целом	45250	18079	0.4

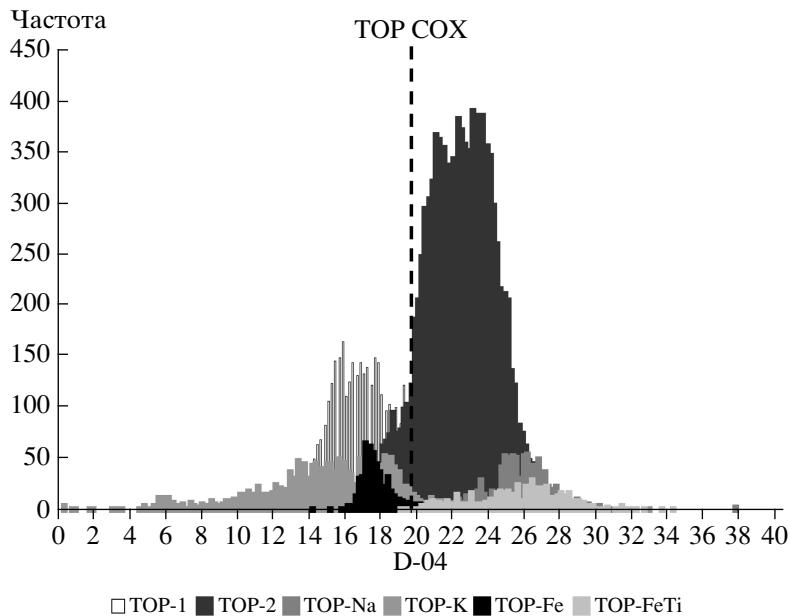


Рис. 13. Гистограмма дискриминанты D-04, характеризующая соотношение объемов 6 групп ТОР для мировой системы срединно-океанических хребтов (COX).

На рис. 12 показаны тренды фракционной кристаллизации для всех групп ТОР в *P-T* координатах. Сюда же нанесены точки, отвечающие составам родоначальных расплавов TOP-1, TOP-2 и TOP-K, установленным экспериментально (табл. 3), а также возможные поля составов этих расплавов.

РЕГИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП ТОР

О равномерности регионального распределения анализов состава ТОР по простиранию срединно-океанических хребтов позволяет судить табл. 4. Из нее следует, что срединные хребты Северной Атлантики и Тихого океана опробованы почти одинаково и близки по степени опробованности к фундаменту коры всего океана в целом – в среднем примерно один анализ на 2 км по простиранию. Это позволяет достаточно надежно сравнивать вариации составов ТОР этих регионов. К аналогичному сравнению с данными по Южной Атлантике и Индийскому океану следует отнестись с осторожностью.

Общее распределение разных групп ТОР для всего Мирового океана, показанное в табл. 1, иллюстрируется гистограммой дискриминанты D-04, позволяющей идентифицировать принадлежность разных групп ТОР к плюмовой или спрединговой ассоциации (рис. 13). D-04 была рассчитана по тем же пяти ключевым аргументам, которые были использованы для 5-ой версии кластерного анализа: TiO₂, Na₂O, K₂O, Na₂O/MgO и K₂O/TiO₂.

В сравниваемые два файла вошли TOP-1 + TOP-K (плюмовая ассоциация) и TOP-2 + TOP-Na (спрединговая ассоциация). Согласно выполненным расчетам D-04 = 6.43 TiO₂ + 7.95 Na₂O – 19.41 K₂O – 19.91 Na₂O/MgO + 0.95 K₂O/TiO₂. Критическое значение D-04₀ = 19.28 (граница между плюмовой и спрединговой ассоциациями). Из рис. 12 следует, что обе ассоциации разделены четко выраженным минимумом: зона перекрытия для TOP-1 и TOP-2 составляет не более 10% от всего множества данных, а составы TOP-Na и TOP-K расположены на оси D-04 с разрывом. Составы TOP-Fe и TOP-FeTi не входили в “обучающие” файлы. Однако на оси D-04 они с разрывом размещены в соответствующих областях: TOP-Fe в области плюмовой ассоциации, а TOP-FeTi в спрединговой, что служит подтверждением их идентификации (см. выше) и является указанием на корректность и эффективность дискриминанты D-04. Рис. 13 отражает соотношения объемов плюмовых и спрединговых ассоциаций и объемов разных групп ТОР для всего Мирового океана, показанные в табл. 1 и охарактеризованные выше.

В табл. 5 приведены данные о составе и распределении разных групп ТОР по главным регионам Мирового океана, рассчитанные в настоящей работе. Наиболее принципиальные различия в распределении объемов плюмовых и спрединговых ассоциаций базальтов и разных групп ТОР видны при сравнении северной части САХ и ВТП, что подчеркивалось и ранее (Дмитриев, 1998; Дмитриев, Соколов, 2002). В этих работах объяснение этого явления было построено на данных о

Таблица 5. Средние составы (X) и стандартные отклонения (σ) 6 групп ТОР для разных регионов Мирового океана

	TOP-1		TOP-2		TOP-Na		TOP-K		TOP-Fe		TOP-FeTi	
	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ
Восточно-Тихоокеанское поднятие ($N = 6273, Q = 34.70\%$)												
SiO ₂	50.19	0.77	50.65	0.58	50.92	0.62	50.73	0.97	49.80	2.34	50.98	0.76
TiO ₂	1.14	0.13	1.63	0.31	2.22	0.19	1.84	0.41	1.30	0.68	2.56	0.30
Al ₂ O ₃	15.88	0.87	15.01	0.87	14.28	0.73	15.79	1.24	15.09	1.98	13.30	0.62
FeO	9.19	0.67	10.33	1.05	11.80	1.01	9.69	1.23	12.21	0.88	13.79	0.66
MgO	8.55	0.51	7.55	0.68	6.38	0.51	6.95	0.79	7.70	1.34	5.77	0.42
CaO	12.52	0.42	11.81	0.51	10.79	0.64	11.04	0.99	11.49	0.78	10.17	0.54
Na ₂ O	2.33	0.14	2.75	0.21	3.17	0.19	3.09	0.39	2.26	0.44	3.01	0.24
K ₂ O	0.08	0.04	0.13	0.06	0.23	0.06	0.60	0.26	0.07	0.05	0.19	0.06
K/Ti	0.07	0.03	0.08	0.04	0.11	0.03	0.33	0.12	0.05	0.01	0.07	0.02
n	404		4700		486		338		8		337	
q	6.4		74.9		8		5		0		5	
Срединно-Атлантический хребет ($N = 7788, Q = 43.08\%$)												
SiO ₂	51.01	0.79	50.92	0.72	51.22	0.55	51.33	1.02	51.09	0.43	50.71	0.84
TiO ₂	1.08	0.18	1.52	0.24	2.06	0.24	1.65	0.47	1.35	0.17	1.94	0.40
Al ₂ O ₃	15.40	0.73	15.49	0.69	15.14	0.61	15.71	0.93	14.14	0.28	13.41	0.49
FeO	9.57	0.79	9.94	0.81	10.65	0.86	9.40	1.27	12.34	0.40	14.28	0.94
MgO	8.20	0.72	7.65	0.58	6.60	0.38	7.09	0.99	7.04	0.32	6.04	0.50
CaO	12.34	0.55	11.46	0.51	10.62	0.48	11.26	1.07	11.78	0.37	10.94	0.59
Na ₂ O	2.16	0.18	2.78	0.26	3.37	0.24	2.81	0.51	2.06	0.10	2.33	0.28
K ₂ O	0.14	0.06	0.13	0.06	0.22	0.07	0.55	0.22	0.11	0.04	0.19	0.07
K/Ti	0.13	0.05	0.09	0.04	0.11	0.04	0.34	0.11	0.08	0.03	0.09	0.02
n	2342		3583		277		1074		399		113	
q	30.07		46.01		3.56		13.79		5.12		1.45	
Индийский океан ($N = 552, Q = 3.05\%$)												
SiO ₂	51.24	1.14	51.30	0.85	51.27	0.41	51.52	0.79	51.24	1.43		
TiO ₂	0.99	0.21	1.39	0.21	1.72	0.18	1.58	0.28	1.29	0.18		
Al ₂ O ₃	15.36	0.97	15.57	0.92	16.41	0.72	15.56	0.88	14.45	0.63		
FeO	9.58	1.12	9.56	1.00	8.84	0.77	9.76	1.34	12.12	0.17		
MgO	8.18	0.80	7.66	0.55	7.20	0.45	6.93	0.73	7.10	0.47		
CaO	12.35	0.59	11.36	0.64	10.42	0.67	11.07	0.80	11.35	0.23		
Na ₂ O	2.14	0.27	2.85	0.35	3.77	0.25	2.98	0.39	2.22	0.04		
K ₂ O	0.09	0.04	0.14	0.06	0.23	0.06	0.43	0.13	0.12	0.05		
K/Ti	0.09	0.03	0.10	0.05	0.13	0.02	0.28	0.09	0.09	0.03		
n	96		397		26		29		4			
q	17.40		71.92		4.71		5.25		0.72			
Галапагосский центр спрединга ($N = 1249, Q = 6.91\%$)												
SiO ₂	50.33	0.65	50.91	0.67	51.87	0.44	49.52	0.72	51.61	0.33	51.04	0.73
TiO ₂	1.04	0.14	1.52	0.31	2.08	0.21	2.00	0.38	1.45	0.10	2.45	0.56
Al ₂ O ₃	15.81	0.65	14.75	0.97	15.60	0.46	17.15	0.88	13.85	0.53	12.92	0.68
FeO	9.43	0.50	10.98	1.51	9.72	0.67	9.14	0.57	11.90	0.35	14.80	1.55
MgO	8.61	0.58	7.45	0.71	6.51	0.57	6.91	0.62	7.39	0.24	5.62	0.66
CaO	12.49	0.34	11.71	0.73	9.90	0.56	10.91	0.74	11.51	0.11	10.29	0.59
Na ₂ O	2.13	0.16	2.44	0.26	3.77	0.23	3.33	0.34	2.16	0.04	2.53	0.18
K ₂ O	0.07	0.03	0.11	0.07	0.28	0.05	0.72	0.23	0.05	0.06	0.15	0.05
K/Ti	0.07	0.02	0.07	0.04	0.14	0.02	0.36	0.09	0.03	0.04	0.06	0.02
n	494		356		109		68		8		214	
q	39.56		28.50		8.73		5.44		0.64		17.13	

Таблица 5. Окончание

	TOP-1		TOP-2		TOP-Na		TOP-K		TOP-Fe		TOP-FeTi	
	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ
Срединно-Атлантический хребет (северная часть, N = 6053, Q = 33.48%)												
SiO ₂	51.03	0.77	50.97	0.75	51.47	0.77	51.44	1.01	51.09	0.42	50.68	0.86
TiO ₂	1.08	0.18	1.50	0.24	1.97	0.22	1.54	0.38	1.35	0.16	1.92	0.41
Al ₂ O ₃	15.37	0.70	15.45	0.70	15.06	0.54	15.76	0.83	14.13	0.27	13.35	0.45
FeO	9.60	0.78	9.98	0.84	10.66	0.75	9.14	1.13	12.33	0.40	14.35	0.93
MgO	8.19	0.72	7.64	0.60	6.51	0.41	7.25	0.91	7.04	0.32	6.06	0.49
CaO	12.34	0.55	11.47	0.51	10.55	0.62	11.41	1.05	11.79	0.33	11.03	0.51
Na ₂ O	2.16	0.18	2.74	0.27	3.41	0.34	2.71	0.48	2.06	0.07	2.26	0.12
K ₂ O	0.14	0.06	0.13	0.06	0.19	0.09	0.55	0.23	0.11	0.04	0.18	0.06
K/Ti	0.13	0.05	0.09	0.04	0.10	0.06	0.35	0.11	0.08	0.03	0.09	0.02
n	2232		2422		57		840		397		105	
q	36.87		40.02		0.94		13.88		6.56		1.73	
Срединно-Атлантический хребет (южная часть, N = 1735, Q = 9.60%)												
SiO ₂	50.62	1.00	50.80	0.62	51.16	0.45	50.94	0.97	52.07	0.12	51.08	0.12
TiO ₂	1.09	0.21	1.55	0.22	2.08	0.24	2.06	0.53	1.99	0.04	2.27	0.07
Al ₂ O ₃	16.06	0.97	15.57	0.67	15.16	0.62	15.55	1.20	14.90	0.10	14.20	0.03
FeO	9.05	0.77	9.87	0.75	10.65	0.89	10.32	1.29	13.36	0.19	13.32	0.09
MgO	8.49	0.67	7.68	0.55	6.62	0.37	6.50	1.05	6.66	0.03	5.77	0.20
CaO	12.23	0.53	11.44	0.49	10.64	0.44	10.73	0.98	9.69	0.58	9.76	0.12
Na ₂ O	2.28	0.23	2.85	0.24	3.36	0.21	3.14	0.45	1.18	0.35	3.24	0.04
K ₂ O	0.08	0.06	0.13	0.07	0.22	0.06	0.57	0.19	0.15	0.05	0.29	0.04
K/Ti	0.07	0.06	0.08	0.04	0.11	0.04	0.28	0.08	0.07	0.03	0.13	0.02
n	110		1161		220		234		2		8	
q	6.34		66.92		12.68		13.49		0.11		0.46	

Примечание. N – число анализов для данного региона, Q – его процент от общего числа использованных анализов, n – число анализов для каждой группы ТОР и доля их опробованности q в данном регионе в %.

разной скорости спрединга САХ и ВТП. Было показано, что при увеличении скорости спрединга (ВТП) возрастает доля спрединговых ассоциаций базальтов относительно плюмовых за счет согласования высокой интенсивности мантийного апвеллинга с высокой скоростью спрединга. Геодинамические и петрологические следствия этих различий детально обсуждаются в упомянутых работах.

Рис. 14 наглядно иллюстрирует различие соотношений объемов плюмовой и спрединговой ассоциаций базальтов и объемов разных групп ТОР при разной скорости спрединга на примере гистограмм D-04 для северной части САХ (рис. 13а) и ВТП (рис. 13б), что отражено также в табл. 4. На рис. 14 хорошо видно резкое преобладание спрединговой ассоциации на ВТП по сравнению с САХ (88% и 12%), в основном за счет увеличения доли ТОР-2 относительно ТОР-1. Объем ТОР-Na на ВТП заметно больше, чем в северной части

САХ, а ТОР-K преимущественно распространен в пределах САХ. ТОР-FeTi (спрединговая ассоциация) занимает значительный объем на ВТП, тогда как в пределах САХ он практически не встречается. ТОР-Fe (плюмовая ассоциация) распространен в пределах САХ, где он пространственно совмещен с хребтами Рейкьянес и Кольбенсей, связанных с Исландским мегаплюмом, а также встречается в районе Азорского мегаплюма и вблизи плюма о-ва Буве. ТОР-Fe установлены также в Красном море и в Индийском океане (хребты с низкой скоростью спрединга). На ВТП ТОР-Fe встречаются в очень ограниченном объеме. Последнее наглядно представлено на карте распределения ТОР-Fe и ТОР-FeTi (рис. 15).

Ранее было отмечено, что в условиях низкой скорости спрединга наблюдается устойчивая корреляция петрологических и геофизических параметров и локализация разных групп ТОР вдоль оси хребта, согласованная с его тектономагмати-

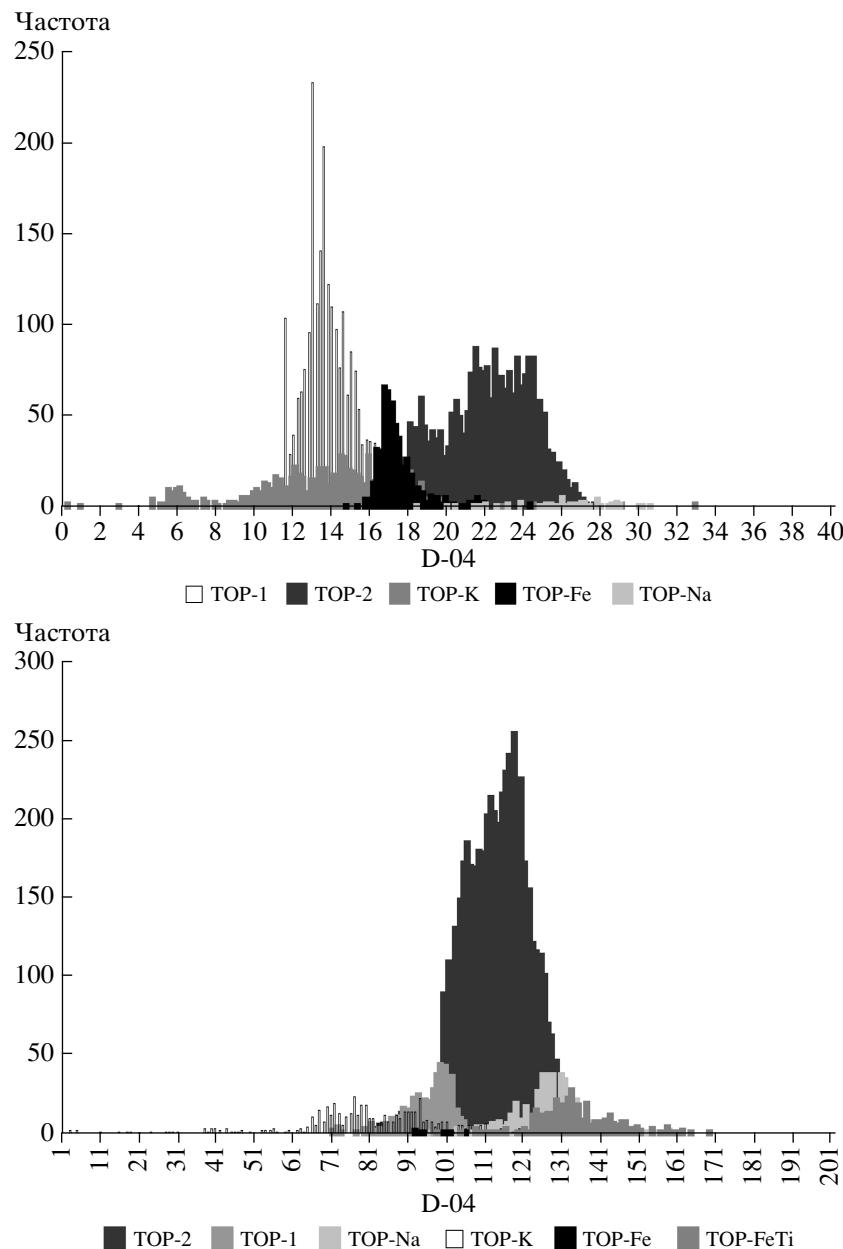


Рис. 14. Изменение соотношения объемов разных групп ТОР в зависимости от скорости спрединга на примере гистограмм дискриминанты D-04 для САХ (а) и ВТП (б).

ческой сегментацией. При высокой скорости спрединга корреляция геофизических и петрологических параметров становится неустойчивой, что приводит к хаотическому распределению ТОР разных групп и их тесному совмещению в пространстве. Было показано, что причина этих различий состоит в том, что увеличение скорости спрединга связано с увеличением интенсивности мантийного апвеллинга и возрастанием продуктивности магматизма. Это может приводить к исчезновению границ между отдельными магматическими провинциями и к смешению расплавов разного генезиса.

Проиллюстрируем это сопоставлением характера распределения ТОР-Na и ТОР-K – двух групп ТОР, наиболее контрастных по петрологическим параметрам, в условиях низкой и высокой скорости спрединга на примере северной части САХ (рис. 16а) и ВТП (рис. 16б). На этих рисунках геохимические различия ТОР-Na и ТОР-K подчеркиваются разной степенью их обогащения (K_2O/TiO_2), а геофизические поля, характер которых обусловлен общей геодинамической обстановкой формирования хребтов, представлены данными спутниковой альtimетрии о распределении аномалии силы тяжести в свободном воздухе

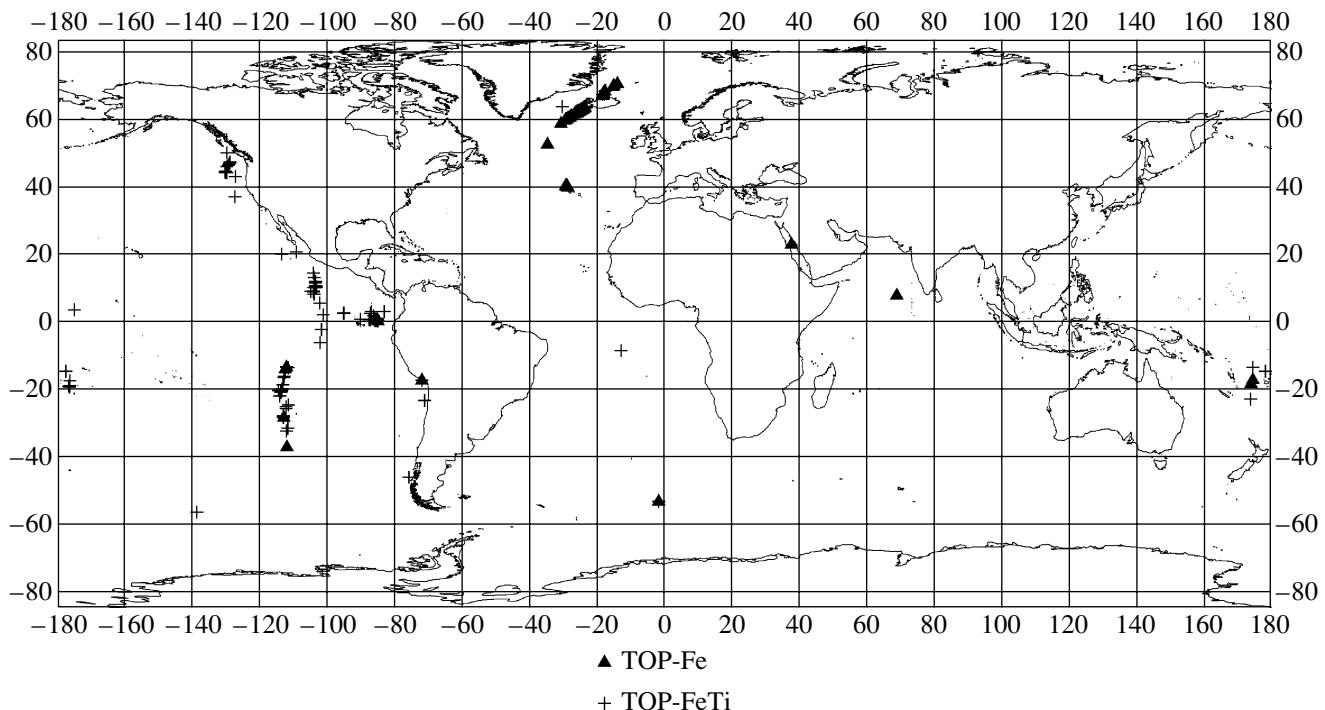


Рис. 15. Схематическая карта распределения TOP-Fe и TOP-FeTi в Мировом океане. Хорошо видно преобладание TOP-Fe в северной части САХ, а TOP-FeTi на ВТП.

(Sandwell, Smith, 1997), отражающими особенности рельефа. Из рис. 16 видно, что при низкой скорости спрединга (САХ) обе группы ТОР заметно разобщены по простиранию хребта, причем ТОР-К приурочены к положительным, а ТОР-На к отрицательным значениям аномалии силы тяжести (формам рельефа). При высокой скорости спрединга (ВТП) эти закономерности нарушаются: к северу от экватора обе группы совмещаются в ограниченном пространстве, а к югу они преимущественно разобщены. Нет отчетливой связи между распределением ТОР-На и ТОР-К и полем силы тяжести.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде всего следует отметить, что в ходе настоящего исследования основные выводы по петрологии и геодинамическим особенностям магматизма океанов, сделанные ранее на ограниченном объеме данных, подтвердились и были существенно уточнены на основе формального статистического анализа (клusterный анализ, анализ гистограмм и ковариаций ключевых параметров, дискриминационный анализ) всего объема данных о составе закалочных стекол базальтов дна Мирового океана.

Сохранилось наличие шести главных устойчивых групп ТОР, были значительно уточнены пределы вариаций их состава и дано более коррект-

ное определение их принадлежности к плумовым или спрединговым ассоциациям.

Применение модернизированной программы Л.В. Данюшевского PETROLOG 2 (Danyushevsky, 2001) и новой версии программы КОМАГМАТ 3.5 (Ariskin, Barmina, 2004) к уточненным данным о вариациях состава разных групп ТОР позволило дать более корректную оценку их дифференциации в координатах давление–температура и определить положение линий тренда дифференциации на количественной основе. Сопоставление этих трендов с данными о P - T условиях отделения родоначальных расплавов от мантии, установленных в эксперименте, показало, что главные группы ТОР действительно происходят из разных родоначальных мантийных расплавов, а смешивание продуктов их дифференциации на пути подъема ограничено либо отсутствует.

Понятно, что выделение шести главных групп базальтов явилось первым необходимым обобщением сложного комплекса вариаций их составов. На практике каждая группа достаточно неоднородна, что стало более очевидным при исследовании всего объема данных. Эта неоднородность обусловлена множеством причин, таких как локальные особенности состава мантийного источника, геодинамическая обстановка дифференциации и др. Вполне вероятно, что дальнейшее развитие исследований приведет к следующему шагу

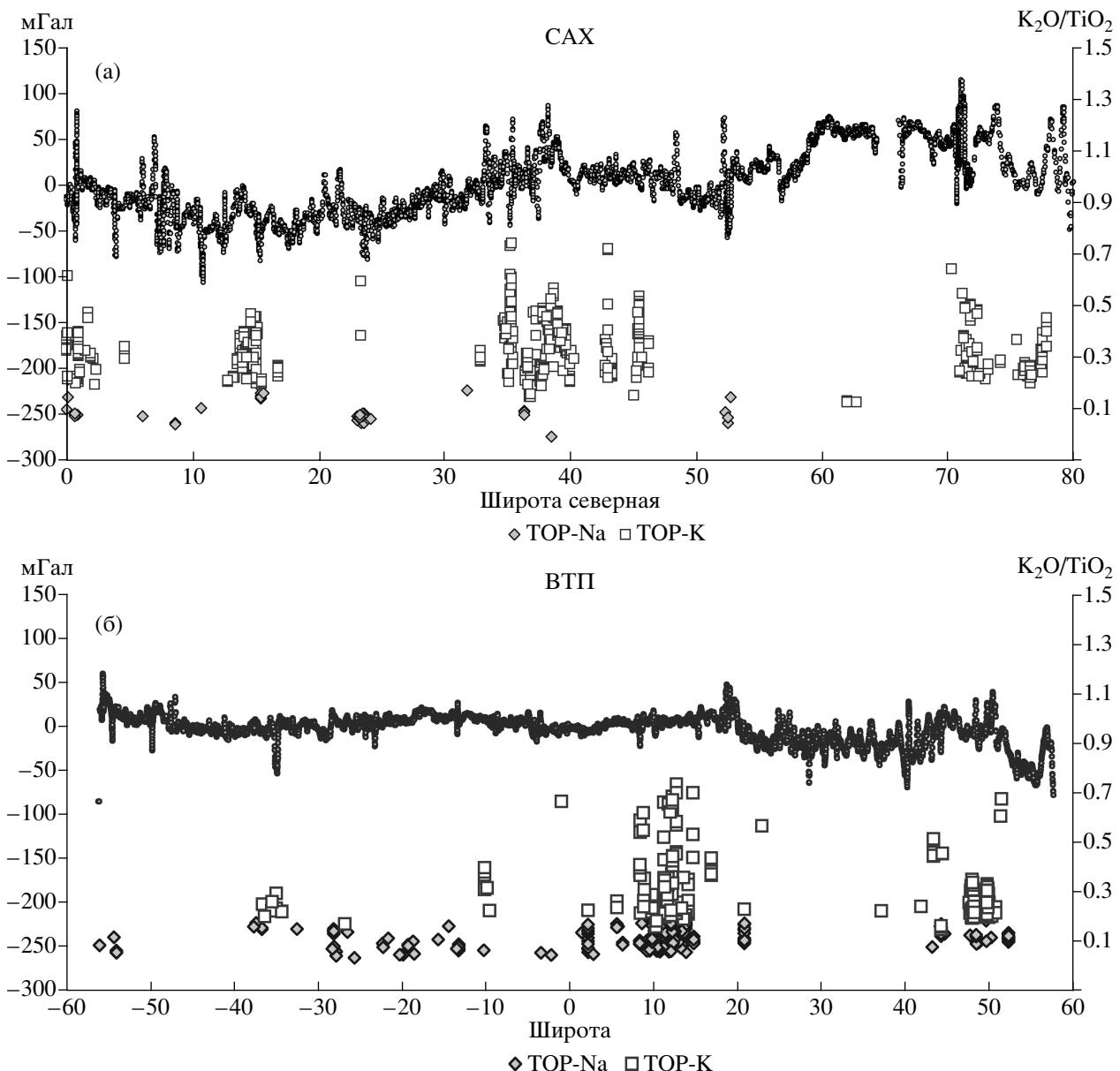


Рис. 16. Сравнение распределения ТОР-На и ТОР-К и его связи с аномалией силы тяжести в свободном воздухе (Sandwell, Smith, 1997) вдоль оси северной части САХ (а) и ВТП (б). Объяснение в тексте.

обобщения и к обоснованию новых групп (или подгрупп) ТОР.

Отметим некоторые свойства и признаки неоднородности состава разных групп ТОР.

ТОР-1. Положение точки состава родоначального расплава ТОР-1, определенного по данным эксперимента, относительно соответствующих поля составов и линии тренда (рис. 12) свидетельствует о том, что образец ТОР-1, на примере которого были реконструированы P - T условия отделения расплава от мантийного источника путем исследования расплавных включений (Sobolev, Dmitriev, 1989; Соболев, 1997), представляет ред-

кую наиболее магнезиальную разность этой группы базальтов. Судя по ориентировке поля составов ТОР-1 в P - T координатах относительно точки состава родоначального расплава ТОР-1, большинство исходных расплавов этой группы может занимать достаточно широкую область параллельно линии солидуса, а их дифференциация может привести к формированию сложной серии составов.

ТОР-2. Вариации состава этой группы представляются наиболее стабильными, а состав родоначального расплава, определенного в эксперименте, лежит на продолжении поля ТОР-2 в

P-T координатах. Базальты этой группы являются наиболее распространенными в глобальной системе срединно-океанических хребтов, а сравнительная стабильность их состава, возможно, обусловлена наиболее оптимальными геодинамическими условиями магматизма всей этой системы.

TOP-Na. Исключительный интерес представляет группа TOP-Na, эволюция которой происходит в условиях наиболее низких значений давления и температуры и при общем минимальном интервале глубины фракционирования. Ранее это объяснялось спецификой геодинамической обстановки мантийного магматизма медленно-спрединговых хребтов, характеризующейся наиболее низкой продуктивностью вулканизма в условиях холодной жесткой литосферы и формированием коры "хессовского типа" (Дмитриев, 1998; Дмитриев и др., 1999; Дмитриев, Соколов, 2002, 2003; Bonatti et al., 2001, 2003; Klein, Langmuir, 1987; Langmuir et al., 1992). Настоящее исследование показало, что TOP-Na достаточно распространены также и в пределах Восточно-Тихоокеанского поднятия – хребта с максимальной скоростью спрединга. Это обстоятельство, несомненно, требует дополнительного детального изучения с привлечением надежной информации о глубин-

ном строении ВТП и гетерогенности его верхних горизонтов. Возможно, что такое исследование позволит ответить на вопросы о сохранности блоков холодной литосферы в условиях интенсивного подъема нагретой мантии, приводящего к быстрому спредингу, размерности этих блоков, неоднородности их состава и о их взаимодействии с мантией. Решению этих вопросов, безусловно, будет способствовать также детальное исследование вариаций состава самих TOP-Na, которые, возможно, включают две подгруппы, дифференцированные на двух уровнях по давлению (>3 кбар и <3 кбар), что можно видеть на рис. 17. В связи с этим возникает вопрос о необходимости экспериментального определения состава родоначального расплава (или расплавов) TOP-Na и условий его (или их) отделения от мантии. Такое исследование представляется весьма важным с точки зрения петрологии, геохимии и геодинамики мантийного магматизма океанов.

TOP-K. Эта группа базальтов обладает максимальной дисперсией составов и наибольшим диапазоном фракционирования в *P-T* координатах, перекрывающим общее поле составов всех остальных групп базальтов и даже выходящим за его пределы. Эта особенность группы TOP-K находит объяснение в следующем. По петрологиче-

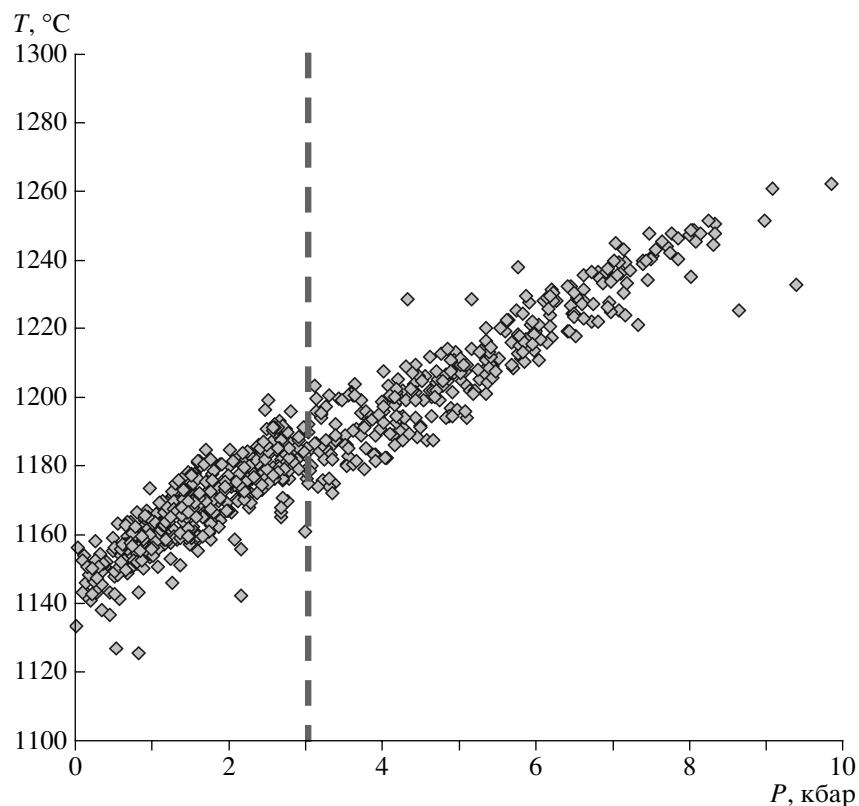


Рис. 17. Поле составов TOP-Na в координатах давление–температура. Пунктиром показана граница между двумя возможными подгруппами TOP-Na.

ским и геохимическим признаком эта группа является переходной к большой самостоятельной и сложной группе базальтов, имеющих источники в нижней мантии или в зоне ее перехода к верхней мантии. По разной терминологии такие базальты относятся к внутриплитным, островным (OIB), к продуктам магматизма "плюмов", "горячих точек", "мантийных струй" и т.п. Несмотря на терминологическое различие, общим механизмом формирования данного типа магматизма считается плавление мантии в результате ее интенсивного локального подъема с большой глубины с прорывом окружающих структур литосферы и с формированием наложенных очагов геохимически обогащенных базальтов широкого диапазона составов. По этим же признакам группа TOP-K отнесена нами к плюмовой ассоциации базальтов срединно-океанических хребтов. Большой диапазон вариаций составов этой группы может быть также обусловлен широким интервалом условий формирования их исходных расплавов из разных по составу мантийных источников. В связи с этим детальное изучение неоднородности состава базальтов группы TOP-K и выяснение причин этих неоднородностей представляет одну из важнейших задач в исследовании петрологии, геохимии и геодинамики мантийного магматизма срединно-океанических хребтов.

TOP-Fe и TOP-FeTi. Каждая из этих групп достаточно однородна по составу, что можно объяснить ограниченными условиями их фракционирования в промежуточных магматических камерах при низком давлении. Однородность каждой группы сохраняется и по уровню содержаний индикаторных элементов Ti, Na и K, что указывает на принадлежность этих групп ТОР к производным либо TOP-1 (TOP-Fe), либо TOP-2 (TOP-FeTi). Это может быть результатом того, что на уровне формирования магматических камер не происходит смешивания расплавов плюмовых и спрединговых ассоциаций. Дальнейшие исследования должны быть ориентированы на выявление железистых и железо-титанистых базальтов как производных TOP-Na и TOP-K.

К числу важных результатов можно отнести уточнение данных о распределении разных групп ТОР в системе срединно-океанических хребтов. Наиболее интересными из них являются данные о значительном увеличении объема спрединговых ассоциаций базальтов в системе ВТП, включая группу TOP-Na, и существенное увеличение объема группы TOP-K в составе плюмовой ассоциации базальтов САХ. Это на количественном уровне подтверждает вывод о зависимости распределения разных групп ТОР – продуктов эволюции разноглубинных источников в мантии – от динамики ее подъема и от скорости спрединга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формальный статистический анализ вариаций состава базальтов для всей глобальной системы срединно-океанических хребтов привел к положительным результатам. Получены новые данные по петрологическим параметрам эволюции мантийного магматизма и по характеру проявления его продуктов в пространстве в зависимости от геодинамической обстановки. На основе полученных результатов стало возможным дать общую оценку степени петрологической изученности магматизма срединно-океанических хребтов и предложить следующую схему идентификации разных групп ТОР для новых поступающих данных о составе их закалочных стекол:

1) определение принадлежности к плюмовым или спрединговым ассоциациям по величине дискриминанты $D-04 = 6.43 \text{ TiO}_2 + 7.95 \text{ Na}_2\text{O} - 19.41 \text{ K}_2\text{O} - 19.91 \text{ Na}_2\text{O/MgO} + 0.95 \text{ K}_2\text{O/TiO}_2$. При значении $D-04_0 < 19.28$ состав относится к плюмовой ассоциации, а при $D-04_0 > 19.28$ к спрединговой ассоциации;

2) составы плюмовой ассоциации с содержанием $\text{FeO} > 11$ мас. % относятся к TOP-Fe, а составы спрединговой ассоциации с содержанием $\text{FeO} > 13$ мас. % – к TOP-FeTi;

3) группе TOP-K отвечают составы плюмовой ассоциации с содержанием $\text{K}_2\text{O} > 0.4$ мас. % и $\text{FeO} < 11$ мас. %;

4) группе TOP-Na отвечают составы спрединговой ассоциации с содержанием $\text{Na}_2\text{O} > 3$ мас. % и $\text{FeO} < 13$ мас. %;

5) группе TOP-1 отвечают составы плюмовой ассоциации с содержанием $\text{K}_2\text{O} < 0.4$ мас. % и $\text{FeO} < 11$ мас. %;

6) группе TOP-2 отвечают составы спрединговой ассоциации с содержанием $\text{Na}_2\text{O} < 3$ мас. % и $\text{FeO} < 13$ мас. %.

Для идентификации групп ТОР можно использовать графики, приведенные на рис. 3 ($\text{Na}_2\text{O/MgO-K}_2\text{O/TiO}_2$) и рис. 11 ($P-T$). В последнем случае расчет значений P и T следует делать по программе PETROLOG 2 (Danyushevsky, 2001).

Во всех случаях ошибка при идентификации группы составляет не более 10%.

Выполненное исследование позволяет также конкретизировать задачи дальнейших исследований.

1. В ходе исследования была получена информация, необходимая для разработки петрологической основы геодинамической модели магматизма шести основных групп базальтов ($P-T$ условия эволюции, продуктивность вулканизма, мантийный апвеллинг, спрединг и др.). При этом данные по геохимии редких несовместимых элементов и изотопов не использовались, что привело к потере детальной информации о геохимической гете-

рогоенности мантийных источников магматизма и ее влиянии на распределение разных групп ТОР, о характере генетической связи разных групп ТОР и их ассоциаций. В связи с этим одна из важнейших дальнейших задач – систематизация фактического материала по геохимии базальтов срединно-океанических хребтов с привязкой их к структурам и с учетом их принадлежности к той или иной группе ТОР.

2. Следует провести сравнительное петролого-геохимическое исследование базальтов и пород плутонического комплекса. В частности, представляет интерес сопоставление ТОР-Fe и ТОР-FeTi с дайковыми и интрузивными габброидами.

3. Самостоятельная важная задача – исследование связи между составом разных групп ТОР и составом их мантийного источника. Особый интерес представляет петролого-геохимический и геодинамический аспекты этой связи.

4. Необходимо дальнейшее изучение корреляции петролого-геохимических и геофизических параметров. Статистическое обоснование выделения шести разных групп базальтов позволило сформулировать ряд конкретных задач по исследованию связи между эволюцией магматизма и геодинамикой формирования литосферы срединно-океанических хребтов на примере ключевых полигонов.

5. Учитывая неравномерность опробования срединно-океанических хребтов, необходим систематический сбор фактического материала в Южной Атлантике, Индийском океане и полярных бассейнах.

Благодарности. Авторы выражают признательность А.А. Арискину, Ю.А. Костицыну и С.А. Силантьеву (ГЕОХИ РАН) и Л.В. Данюшевскому (Университет Тасмании, Хобарт) за плодотворную дискуссию и обсуждение перспективы развития исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 04–05–64905 и Федерального агентства по науке и инновациям, Научная школа № НШ–1831. 2003.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гуренко А.А., Соболев А.В., Кононкова Н.Н. Щелочные рифтогенные базальты Исландии: новые данные по петрологии // Геохимия. 1999. № 9. С. 1262–1274.

Дмитриев Л.В. Вариации состава базальтов срединно-океанических хребтов как функция геодинамической обстановки их формирования // Петрология. 1998. Т. 6. № 4. С. 340–362.

Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю. Геодинамика трех контрастных типов магматизма океана и их отражение в данных сейсмотомографии // Петрология. 2003. Т. 11. № 6. С. 655–672.

Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю. Плюмовые и спрединговые ассоциации базальтов в глобальной системе сре-

динно-океанических хребтов // Мантийные плюмы и металлогения. Материалы Международного симпозиума. 4–7 сентября 2002 г. Петрозаводск–Москва, 2002. С. 90.

Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Мелсон В.Дж., О'Хирн Т. Плюмовая и спрединговая ассоциации базальтов Срединно-Атлантического хребта и их отражение в петрологических и геофизических параметрах // Российский журнал наук о земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 457–476.

Дмитриев Л.В., Соболев А.В., Данюшевский Л.В., Ахметов К.С. Сегментация Срединно-Атлантического хребта и ее связь с давлением кристаллизации и содержанием воды в базальтовых расплавах // Нелинейная геодинамика. Ред. Ю.М. Пущаровский. М.: Наука, 1994. С. 26–54.

Дмитриев Л.В., Соболев А.В., Рейнер М.Г., Мелсон В.Дж. Петрохимические группы закалочных стекол ТОР (толеиты океанических рифтов) и их распределение в Атлантическом и Тихом океанах // Магматизм и тектоника океана. Ред. Ю.М. Пущаровский. М.: Наука, 1990. С. 43–108.

Дмитриев Л.В., Соболев А.В., Сущевская Н.М. Первичный расплав океанических толеитов и состав верхней мантии океана // Докл. АН СССР. 1978. Т. 240. № 1. С. 177–180.

Коваленко В.И., Гирнис А.В., Дорофеева В.А., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В. Источники магм океанических островов // Докл. АН. 2004. Т. 398. № 3. С. 379–384.

Соболев А.В. Проблемы образования и эволюции мантийных магм. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ГЕОХИ РАН, 1997. 56 с.

Ariskin A.A. Phase equilibria modeling in igneous petrology: use of COMAGMAT model for simulating fractionation of ferro-basaltic magmas and the genesis of high-alumina basalt // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1999. V. 90. P. 115–162

Ariskin A.A., Barmina G.S. COMAGMAT: development of a magma crystallization model and its petrological applications // Geochemistry International. 2004. V. 42. Suppl. 1. P. S1–S157.

Asimov P.D., Langmuir C.H. The importance of water to oceanic mantle melting regimes // Nature. 2003. V. 421. P. 815–820.

Bonatti E., Ligi M., Brunelli D., Fabretti P., Portaro R.A., Seyler M. Steady-state creation of crust-free lithosphere at cold spots in mid ocean ridges // Geology. 2001. V. 29. P. 979–982.

Bonatti E., Ligi M., Brunelli D., Cipriani A., Fabretti P., Ferrante V., Gasperini L., Ottolini L. Mantle thermal pulses below the Mid-Atlantic Ridge and temporal variations in the formation of oceanic lithosphere // Nature. 2003. V. 423. P. 499–505.

Danyushevsky L.V. The effect of small amount of H₂O crystallization of mid-ocean ridge and backarc basin magmas // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2001. V. 110. P. 265–280.

Danyushevsky L.V., Sobolev A.V., Dmitriev L.V. Estimation of pressure of crystallization and H₂O content of MORB and BABB glasses: calibration of an empirical technique // Mineralogy and Petrology. 1996. V. 57. P. 185–204.

Herzberg C., Zhang J. Melting experiments on anhydrous peridotite KLB-1: composition of magmas in the upper man-

- tle and transitional zone // *Journal of Geophysical Research*. 1996. V. 101. № 4. P. 8271–8295.
- Jarosevich E., Nelen J.A., Norberg J.A.* Electron microprobe reference samples for mineral analyses // *Smithsonian Contribution to Earth Sciences*. 1979. V. 22. P. 68–72.
- Klein E.M., Langmuir C.H.* Global correlation of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness // *Journal of Geophysical Research*. 1987. V. 92. P. 8089–8115.
- Langmuir C.H., Klein E.M., Plank T.* Petrological systematics of Mid-Ocean Ridge basalts: constraints of melt generation beneath ocean ridges // *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-Ocean Ridges*. Eds J. Phipps Morgan et al. Washington D.C. AGU. 1992. P. 183–280.
- McDonald G.A., Katsura T.* Chemical composition of Hawaiian lavas // *Journal of Petrology*. 1962. V. 5. P. 82–133.
- Melson W.G., Byerly G.R. et al.* A catalog of major element chemistry of abyssal volcanic glasses // *Smithsonian Contribution to Earth Sciences*. 1977. V. 19. P. 31–60.
- Ridge Petrological Data Base. LDEO. 1999 (<http://petdb.ldeo.columbia.edu/petdb/>).
- Sandwell D.T., Smith W.H.F.* Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite altymetry // *Journal of Geophysical Research*. 1997. V. 102. № 5. P. 10 039–10 054.
- Smithsonian Volcanic Glass Data File. 2000 (<http://www.nmnih.si.edu/minsci/research/glass/>).
- Sobolev A.V., Dmitriev L.V.* Primary melts of tholeiites of oceanic rifts (TOR): evidence from studies of primitive glasses and melt inclusions in minerals // 28th IGC. Washington D.C. USA. Abstracts. 1989. P. 147–148.