

# Сравнение базальтового магматизма в условиях разной скорости спрединга на примере Срединно-Атлантического хребта (САХ) и Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП)

Л. В. Дмитриев, С. А. Силантьев, А. А. Плечова

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

С. Ю. Соколов

Геологический Институт РАН

**Аннотация.** Сравнение вариаций состава ТОР (Толитовые базальты Океанических Рифтов) Срединно-Атлантического хребта (САХ) и Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП) по данным более 12 000 анализов закалочных стекол показало следующее. Во всех трех регионах базальтовый магматизм развивается в условиях двух разных геодинамических обстановок – спрединговой и плюмовой – с образованием соответствующих ассоциаций ТОР. Для спрединговых ассоциаций ТОР всех регионов характерно обогащение  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{TiO}_2$  и полибарическое фракционирование при котектической кристаллизации. ТОР плюмовых ассоциаций обогащены  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$ . Дифференциация происходит в условиях перехода от полибарического фракционирования к внутрикамерному. Ассоциация включает локализованные проявления глубинных ТОР, обогащенных калием. С увеличением скорости спрединга возрастает продуктивность магматизма, интервал РТ условий котектической кристаллизации, диапазон вариаций состава ТОР, увеличивается доля спрединговых ассоциаций относительно плюмовых. При низкой скорости спрединга развитие плюмов представляется как независимый процесс, наложенный на спрединг. При этом плюмовые и спрединговые ассоциации ТОР резко обособлены в пространстве. С возрастанием скорости спрединга границы между плюмовыми и спрединговыми ассоциациями исчезают. Интервал подъема мантии и глубина зоны ее плавления не зависят от скорости спрединга.

## Введение

Сопоставление вариаций состава ТОР Атлантического и Тихого океанов (Толиты Океанических Рифтов), выполненное в начале 90х годов на имеющемся в это время материале по составу их закалочных стекол, привело к следующим выводам [Дмитриев и др., 1990, 1994].

- Условия эволюции базальтового магматизма в обоих океанах дискретны, т.е. в пределах одного определенного пространства они постоянны, но меняются при переходе к другому

определенному пространству. Следствием этого является бимодальность всего сообщества составов ТОР, особенно резко выраженная в Атлантике, а также существование нескольких определенных групп составов ТОР, отличающихся по значениям петрологических параметров их эволюции.

- Скорость спрединга функционально связана с распределением разных групп ТОР в пространстве срединно-океанических хребтов. В северной части САХ, как эталона низкой скорости спрединга, разные группы ТОР образуют большие провинции в пределах крупных сегментов хребта 1-го порядка, а вдоль ВТП, как эталона высокой скорости спрединга, те же группы ТОР распределены мозаично, без определенного порядка. Крупных базальтовых про-

©2000 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE00041.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 8 января 2001.  
URL: <http://eos.wdcb.ru/rjes/v03/RJE00041/RJE00041.htm>

винций здесь не было установлено. В южной, менее изученной части САХ, формирующейся в условиях переменной скорости спрединга, протяженных базальтовых провинций также не установлено.

Позже на примере более детально исследованной северной части САХ было показано, что бимодальность состава ТОР обусловлена сосуществованием здесь двух принципиально различных геодинамических обстановок, проявляющихся на отдельных больших отрезках по простиранию хребта [Дмитриев, 1998; Дмитриев и др., 1999]. Для всего отрезка САХ от экватора до 80° с.ш., включающего проявления обеих геодинамических обстановок, установлена надежная корреляция петрологических параметров магматизма, рассчитанной мощности базальтового слоя и геофизических параметров (аномалии силы тяжести, сейсмичность, тепловой поток, поверхность геоида, глубинная структура литосферы по данным томографии). Комбинации перечисленных параметров в пространстве хорошо согласуются с данными о тектоно-магматической сегментации САХ разного порядка.

Исключительно важными представляются данные о генетическом родстве базальтов спрединговой и плюмовой ассоциаций с соответствующими им породами плутонического комплекса (остаточные мантийные перидотиты, габброиды) [Силантьев и др., 1999; Silant'ev et al., 1995].

Все упомянутое рассматривается как признак тесного взаимодействия глубинных мантийных движений, глобальной тектоники плит, формирования коры и ее современной структуры, а также мантийного магматизма в активный период аккреции литосферы САХ. Сделан вывод о том, что дискретность условий эволюции магматизма вызвана дискретностью всей совокупности внешних геологических условий, по отношению к которым магматизм следует рассматривать как явление второго порядка.

Для ВТП такого рода обобщения не проводились, хотя в известных публикациях отмечаются важные петрологические и геохимические особенности базальтов этого региона, обсуждаются вопросы о связи состава базальтов со скоростью спрединга [Niu and Batiza, 1993; Niu and Hekinian, 1997], подчеркивается широкое распространение магматических камер и образующихся в них FeTi – базальтов [Batiza et al., 1996], отмечается высокая продуктивность магматизма, приводящая к образованию мощной базальтовой коры, дается характеристика проявлений обогащенных базальтов, имеющих сходство с проявлениями внутриплитового магматизма [Batiza et al., 1996; Hekinian and Fouquet, 1985; Thompson et al., 1989]. Менее изучены базальты южной части САХ. Здесь

в последнее время исследования в основном были направлены на изучение магматизма “горячих точек” [Douglass and Schilling, 1999; Simonov et al., 1996].

В связи с изложенным представляет интерес на новом более обширном фактическом материале провести сопоставление магматизма ТОР в условиях медленного и быстрого спрединга на примере САХ и ВТП. Этот материал в виде банков данных недавно стал доступен через сеть Интернет, что, в известной мере, стимулировало настоящее исследование.

## Фактический материал.

Для сравнения особенностей базальтового магматизма, развивающегося в условиях разной скорости спрединга, были выбраны три региона: северная часть САХ от экватора до САХ 80° с.ш. (хребет Ян-Майен) с низкой скоростью спрединга – 1–2 см в год, южная часть САХ от экватора до 55° ю.ш. (у тройного сочленения Буве) с переменной скоростью спрединга от низкой вблизи экватора – 2–3 см в год до умеренной в южной части хребта – 5–6 см в год, и ВТП с хребтами Горда и Хуан де Фука в интервале от 40° ю.ш. до 60° с.ш. с умеренной скоростью спрединга в северных широтах – 5–6 см в год до высокой вблизи экватора – 10–12 см в год. В данном исследовании не требовались абсолютные значения скоростей спрединга с детальной привязкой к пространству. Здесь дается лишь их приближенная оценка, выполненная по карте линейных магнитных аномалий Мирового океана [Международный геолого-геофизический атлас Атлантического океана, 1990] и которая не противоречит общепринятым представлениям, например [Сорохтин, Ушаков, 1991].

В работе использованы данные по составу заклочных стекол современных (“zero-age”) базальтов осевой части САХ и ВТП, заимствованные из [Petrological Database of the Ocean Floor (LDEO, RIDGE), 2000; Smithsonian Institution Volcanic Glass Data, 2000], а также данные, опубликованные в [Симонов и др., 1999; Суцеская и др., 1992, 1995, 1996; Batiza et al., 1996; Niu and Batiza, 1993; Thompson et al., 1989] в сумме составляющие 12689 анализов. Из них на северную часть САХ приходится 5469 анализов, на южную часть САХ от экватора до тройного сочленения Буве (56° с.ш.) 1062 анализа, и на ВТП, включая хребты Горда и Хуан де Фука от 40° ю.ш. до 53° с.ш. 6158 анализов.

Все использованные данные представляют выборку микронзондовых определений, приведенных к единому стандарту 111240/52.

Необходимо отметить неравномерность опробования всех трех регионов. В каждом из них есть

участки с разной плотностью опробования, чередующиеся с неопробованными участками разной протяженности. В южной части САХ в среднем на каждый градус по широте приходится около 20 анализов, а на северную часть САХ и на ВТП примерно по 70 анализов на градус. В связи с этим полученные результаты формально могут рассматриваться лишь в виде качественной оценки сходств и различий состава базальтов и условий их эволюции в трех сравниваемых регионах.

Профили аномалий гравитационного поля в свободном воздухе (редукция Фая) вдоль осевых рифтовых зон хребтов, отражающих, в основном, характер их рельефа, построены по данным [McAdoo and Laxon, 1997; Sandwell and Smith, 1997]. Эти материалы дают реальную картину изменения значений аномалий в мГал вдоль выбранных профилей на количественном уровне, так как они равномерно распределены на всем пространстве с одинаковым разрешением 2 дуговых минуты.

## Вариации петрохимического состава

На рис. 1а–д показаны вариационные диаграммы главных петрогенных элементов, дающие самое общее представление о сходствах и различиях состава базальтов северной и южной частей САХ и ВТП.

Эти диаграммы показывают, прежде всего, что диапазон содержаний всех петрогенных элементов в базальтах северной части САХ заметно меньше, чем в базальтах южной части САХ и ВТП. Это связано с тем, что первые значительно меньше дифференцированы по сравнению со вторыми (содержание MgO в них, за редким исключением, не меньше 5–6 %).

Сходство базальтов южной части САХ и ВТП хорошо видно по характеру трендов их дифференциации, менее развитых в базальтах северной части САХ. Основные отличия по содержанию главных петрогенных элементов в базальтах северной части САХ от двух других регионов вне зависимости от степени их дифференциации состоят в следующем.

Базальты северной части САХ сравнительно обогащены SiO<sub>2</sub> (рис. 1а) и CaO (рис. 1б) и обеднены Na<sub>2</sub>O (рис. 1в). Базальты южной части САХ и ВТП обогащены натрием и титаном (рис. 1в и 1г). Для их резко дифференцированных разностей характерно сильное обогащение FeO и TiO<sub>2</sub> (рис. 1г) и K<sub>2</sub>O (рис. 1д). Большинство базальтов всех регионов имеет соотношение TiO<sub>2</sub> и K<sub>2</sub>O характерное для нормальных (обедненных) базальтов (рис. 1д).

Представляет интерес сопоставление всех трех регионов с использованием данных о составах и РТ условиях дифференциации разных групп ТОР северной части САХ и об их ассоциациях, соответ-

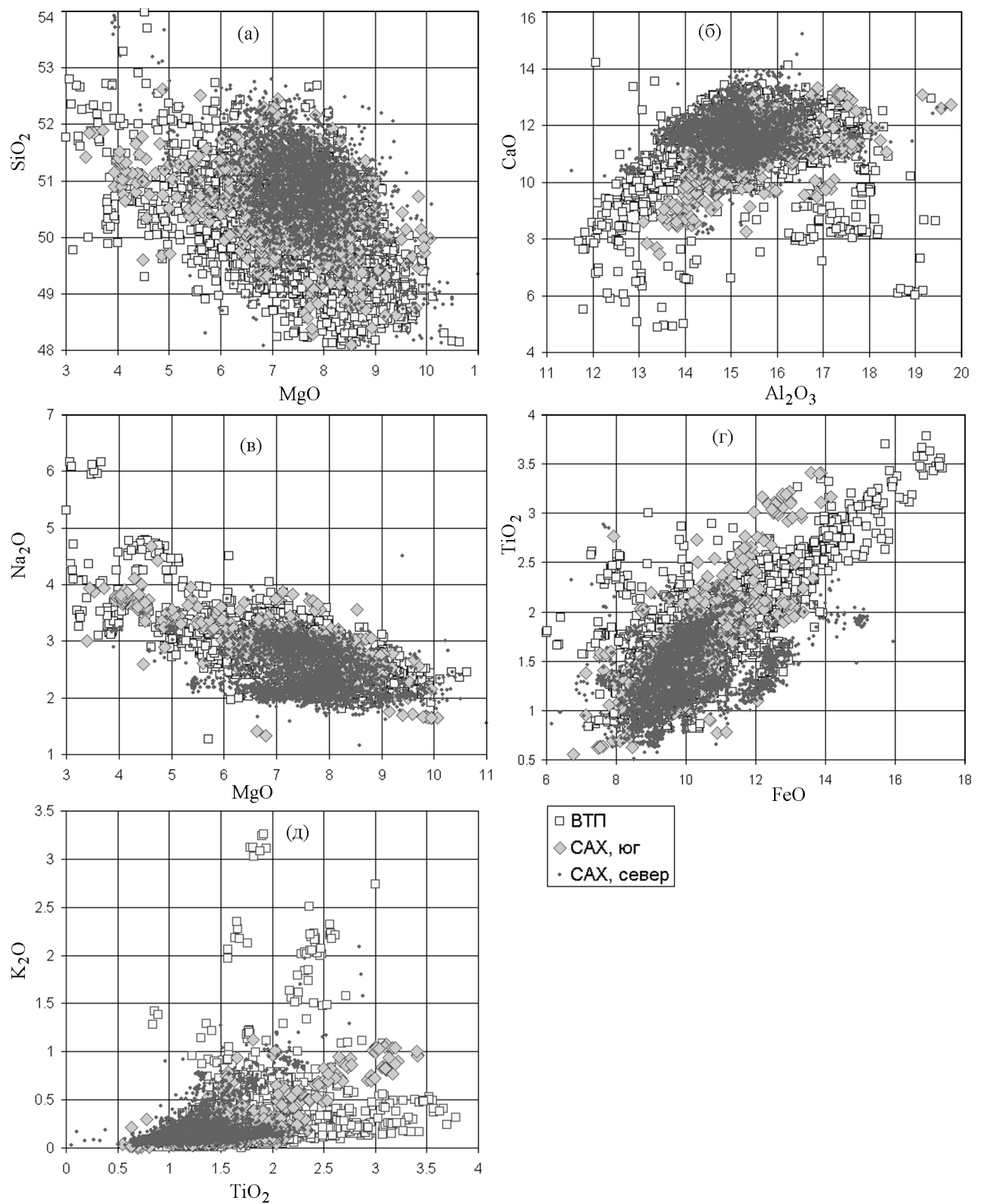
ствующих двум разным геодинамическим обстановкам (спрединговой и плюмовой), о чем упоминалось выше, и было детально охарактеризовано в [Дмитриев и др., 1999].

Согласно [Дмитриев, 1998; Дмитриев и др., 1990, 1994], в Атлантическом и в Тихом океанах толеитовые базальты включают шесть групп, отличающихся по РТ условиям отделения их родоначальных расплавов от мантийного источника (экспериментальные и расчетные данные [Соболев, 1997; Соболев, Никогосян 1994]) и по РТ трендам их котектической кристаллизации, восстановленным с использованием методики [Danyushevsky et al., 1996].

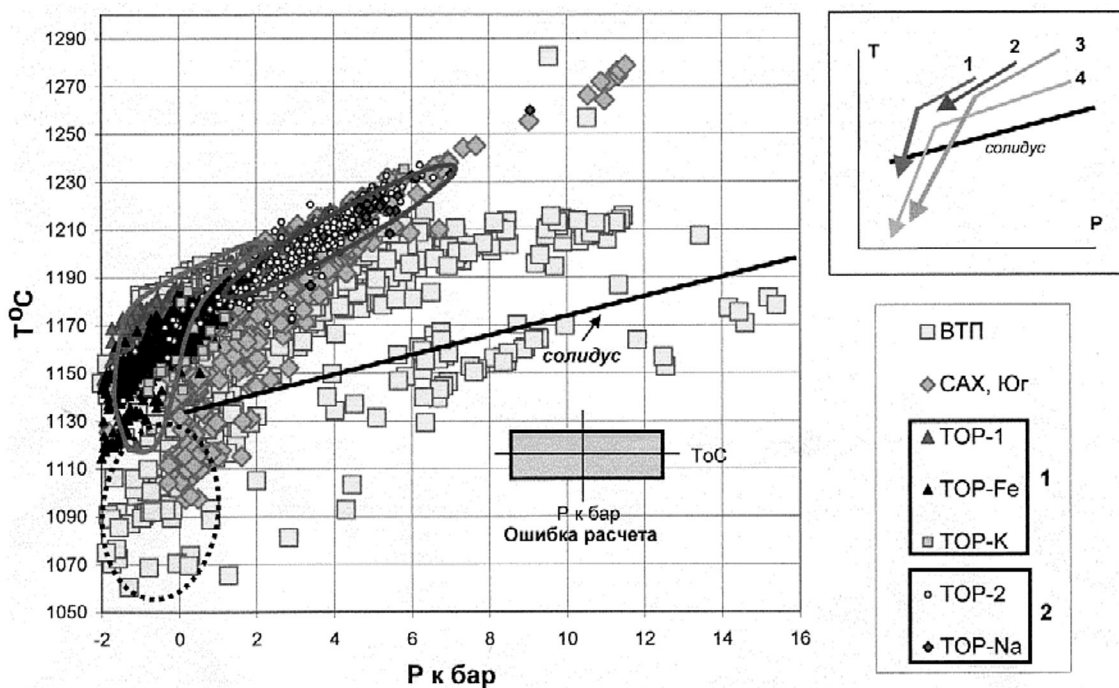
Сюда входят:

- ТОР-1 – продукты развитой полибарической дифференциации родоначальных расплавов, отделяющихся от мантийного источника при давлении P~15 кбар и температуре ~1420°C),
- ТОР-2 – обедненные базальты – продукты слабого полибарического фракционирования расплавов, отделяющихся от мантии при P~9 кбар и T~1270°C,
- ТОР-Na – редкие, обогащенные натрием, слабо дифференцированные базальты. Условия отделения от мантии – P~12 кбар, T~1320°C).
- ТОР-K – редкие проявления обогащенных дифференцированных расплавов, берущих начало вблизи границы верхней и нижней мантии (P~20 кбар, T~1380°C).
- ТОР-Fe – продукты внутрикамерной дифференциации ТОР-1 при P около 1 кбар и T не более 1170°C.
- ТОР-FeTi – сильно дифференцированные, резко обогащенные железом и титаном базальты, широко распространенные в Тихом океане (в северной Атлантике известна лишь одна точка с выходами таких базальтов).

На рис. 2 в координатах P кбар – T°C, рассчитанных по усовершенствованной методике [Danyushevsky, 1998] показано сравнение полей котектической кристаллизации базальтов ВТП, южной части САХ и разных групп ТОР северной части САХ. В красном овале – поле плюмовой ассоциации северной части САХ, обозначенной в легенде цифрой 1, в синем овале – поле спрединговой ассоциации северной части САХ (цифра 2). В черном штриховом овале – поле ТОР-FeTi. Прежде всего видно, что котектическая кристаллизация базальтов северной части САХ происходит в значительно меньшем интервале



**Рис. 1.** Вариации состава базальтов северной и южной частей САХ и ВТП в координатах содержаний главных петрогенных элементов (мас.%). а) MgO–SiO<sub>2</sub>; б) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO; в) MgO–Na<sub>2</sub>O; г) FeO–TiO<sub>2</sub>; д) K<sub>2</sub>O–TiO<sub>2</sub>.



**Рис. 2.** Условия котектической кристаллизации базальтов САХ и ВТП по давлению  $P$  кбар и температуре  $T^\circ C$ . Справа сверху стрелками показана схема основных трендов фракционирования. Линия сухого солидуса по [Herzberg and Zhang, 1996]. Обозначения. 1 – плюмовая ассоциация северной части САХ, 2 – спредингловая ассоциация северной части САХ, 3 – южная часть САХ, 4 – ВТП. В черном пункте (слева внизу) поле TOP-FeTi.

РТ условий по сравнению с базальтами ВТП и южной части САХ. Это согласуется с данными о разном диапазоне составов всех трех регионов.

В правой верхней части диаграммы стрелками схематически показаны тренды котектической кристаллизации.

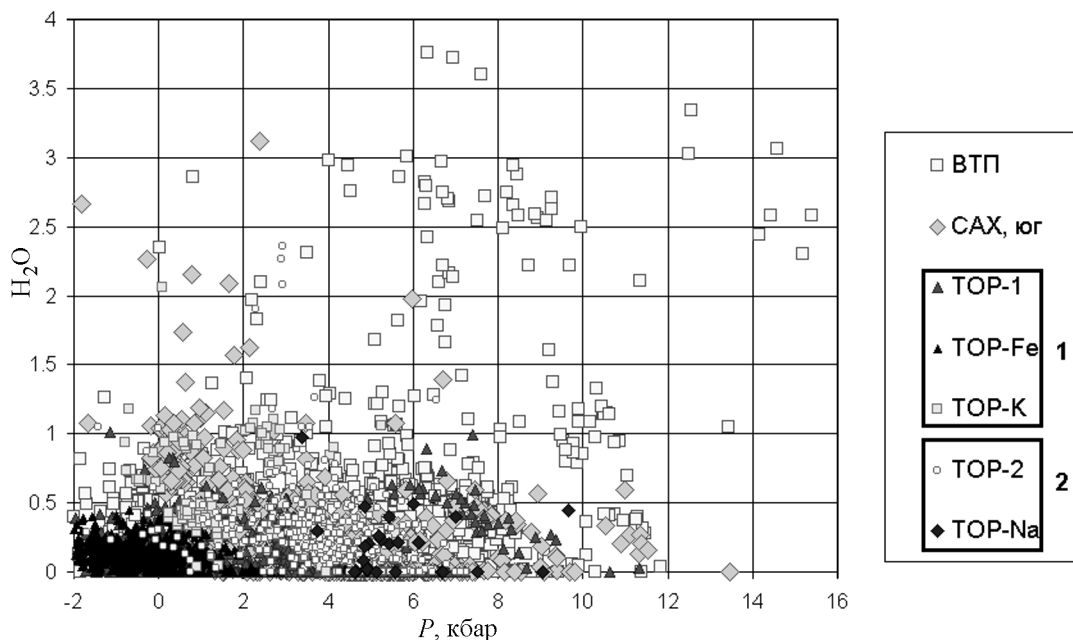
Для плюмовой ассоциации северной части САХ характерен переход от полибарического фракционирования к внутрикамерной дифференциации. В условиях медленного спрединга северной части САХ происходит, в основном, полибарическое фракционирование [Дмитриев и др., 1999]. В южной части САХ и в пределах ВТП полибарическое фракционирование переходит к внутрикамерной дифференциации. Положение стрелок относительно линии сухого солидуса по [Herzberg and Zhang, 1996] подчеркивает разный интервал РТ условий котектической кристаллизации всех трех регионов.

Наиболее наглядно выражены следующие различия.

Поля кристаллизации базальтов северной части САХ заметно смещены в область более высокой температуры относительно полей южной части САХ и ВТП.

Тренды внутрикамерной дифференциации южной части САХ и ВТП более резко выражены по сравнению с плюмовой ассоциацией северной части САХ. Это подчеркивается положением поля TOP-FeTi, лежащем в более широком интервале РТ условий относительно поля TOP-Fe северной части САХ. Смещение полей кристаллизации базальтов ВТП в сторону повышенного давления при относительно постоянной температуре может быть признаком того, что этот процесс развивается здесь в условиях более высокого содержания воды. Об этом же свидетельствует пологий наклон поля полибарической кристаллизации базальтов ВТП к оси давления, а также положение небольшой группы базальтов вблизи линии солидуса. Тренды полибарического фракционирования базальтов северной и южной частей САХ совпадают. Однако переход к внутрикамерной дифференциации базальтов южной части САХ, начинающийся на том же интервале температуры, происходит при более высоком давлении, что также может быть признаком повышения содержания воды.

Это иллюстрируется рис. 3, где все группы базальтов показаны в координатах  $P$  кбар –  $H_2O$  мас.%. Расчет содержания воды с ошибкой  $H_2O + 0,2\%$  вы-



**Рис. 3.** Котектическая кристаллизация базальтов САХ и ВТП в координатах  $P$  кбар– $H_2O$ . Обозначения. 1 – плюмовая ассоциация северной части САХ, 2 – спредингвая ассоциация северной части САХ, 3 – южная часть САХ, 4 – ВТП.

полнен также по упомянутой методике Л. В. Данюшевского.

На рис. 3 видно, что в высокобарных базальтах ВТП, действительно, содержание воды повышено (1–1,5%), а в небольшой группе субщелочных базальтов (на графике вблизи линии солидуса) оно может достигать 4%. В северной части САХ повышение содержания воды до 1–1,5% связано лишь с локальными проявлениями аномальных TOP-K или редких специфических базальтов плюмовой и спредингвой ассоциации [Dmitriev et al., 1996; Plechova, 1998].

Рис. 3 показывает также, что кристаллизация базальтов южной части САХ при давлении ниже 4 кбар (начало внутрикамерной дифференциации) сопровождается повышением содержания воды (до 1–1,5%). В единичных случаях (также, как в северной части САХ и ВТП) содержание воды в сильно дифференцированных базальтах повышается до 2–3%.

Представляет самостоятельный интерес сопоставление железистых базальтов (TOP-Fe и TOP-FeTi), образующихся при внутрикамерной дифференциации во всех регионах. Для такого сопоставления были выбраны базальты с содержанием  $FeO > 11\%$  и  $MgO < 8\%$ . На рис. 4–6 показаны графики, дающие представление о сходствах и различиях TOP-Fe плюмовой ассоциации северной части САХ и их возможных аналогов TOP-Fe и TOP-FeTi на ВТП и в южной части САХ. На рис. 4 видно, что внутрикамерная дифференциация TOP-Fe и TOP-FeTi южной

части САХ и ВТП происходит в более широком интервале давления, но при более низкой температуре по сравнению с TOP-Fe северной части САХ. Последнее согласуется с тем, что TOP-Fe и TOP-FeTi южной части САХ и ВТП значительно обогащены водой, связанной положительной корреляцией с содержанием калия (рис. 5), а также обогащены натрием и обеднены кальцием (рис. 6) по сравнению с TOP-Fe плюмовой ассоциации северной части САХ. Рисунки иллюстрируют тренды корреляции главных петрогенных элементов при дифференциации сравниваемых серий базальтов.

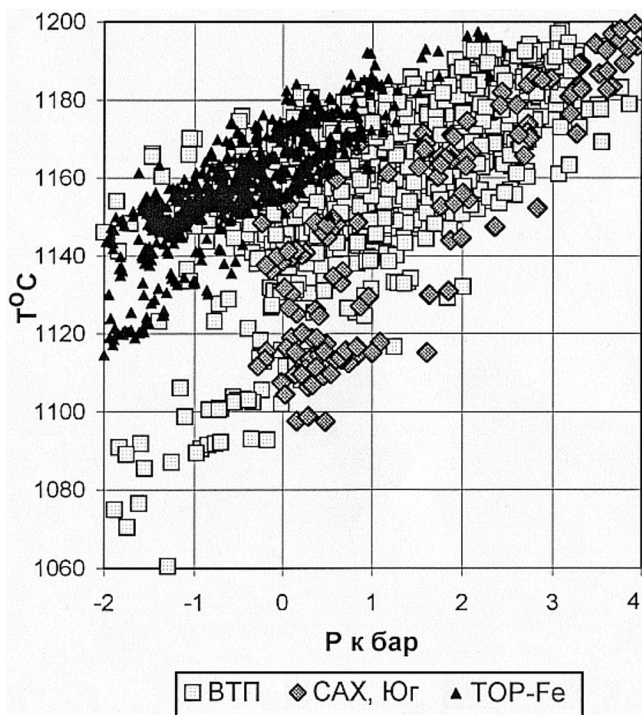
### Плюмовые и спредингвые ассоциации TOP

Как упоминалось, северная часть САХ формировалась в условиях двух контрастных геодинамических обстановок – плюмовой и спредингвой. В ходе развития плюмовой обстановки происходит интенсивный подъем сильно нагретого вещества мантии с больших глубин, что сопровождается высокой продуктивностью магматизма и формированием мощного слоя базальтовой коры. Проявления плюмовой обстановки четко локализованы в пространстве – здесь известны два суперплюма (Азорский и Исландский, разделенные узким блоком литосферы, образованной в ходе медленного спрединга) и ряд микро-

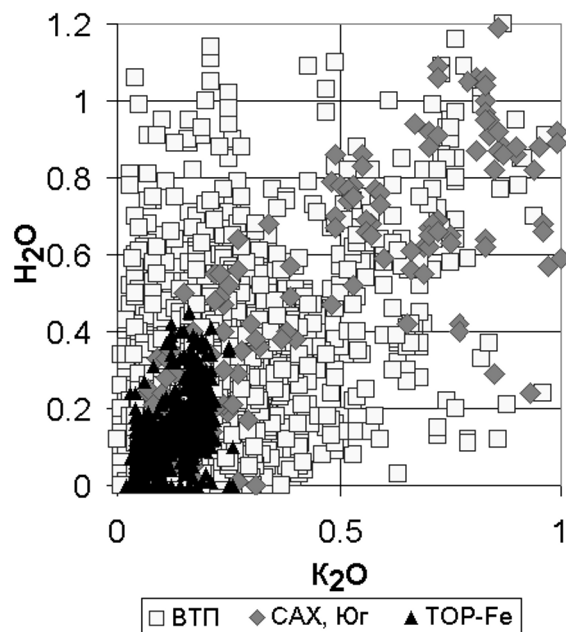
плюмов, занимающих пространство не более 100 км по простиранию хребта. При медленном спрединге подъем мантии происходит с меньших глубин и при более низкой температуре. Продуктивность магматизма здесь низкая, базальтовый слой маломощный, а в ряде участков хребта отсутствует. Образуется кора “Хессовского типа” [Cannat et al., 1995; Escartin and Cannat, 1999; Snow, 1995].

Это четко отражается в геоморфологии хребта и в его геофизических параметрах. Естественно, в ходе развития этих двух обстановок формируются две разные ассоциации базальтов (плюмовая и спрединговая), значимо отличающиеся по вариациям состава и условиям эволюции. В первую входят ТОР-1, ТОР-Fe и ТОР-K, а во вторую – ТОР-2 и ТОР-Na.

Резкие различия обеих геодинамических обстановок по всем перечисленным признакам дали возможность рассчитать эмпирическую дискриминанту D1, позволяющую идентифицировать эти обстановки по содержаниям восьми главных петрогенных элементов базальтового расплава (составы закалочных стекол) [Дмитриев и др., 1999; Суцеская и др., 1983]. В связи с этим представляет интерес возможность использовать эту дискриминанту для идентификации плюмовой и спрединговой обстановки в южной части САХ и на ВТП. При этом, однако, следует



**Рис. 4.** Котектическая кристаллизация ТОР северной части САХ и ВТП, содержащих более 11% FeO в координатах P кбар–T°C.

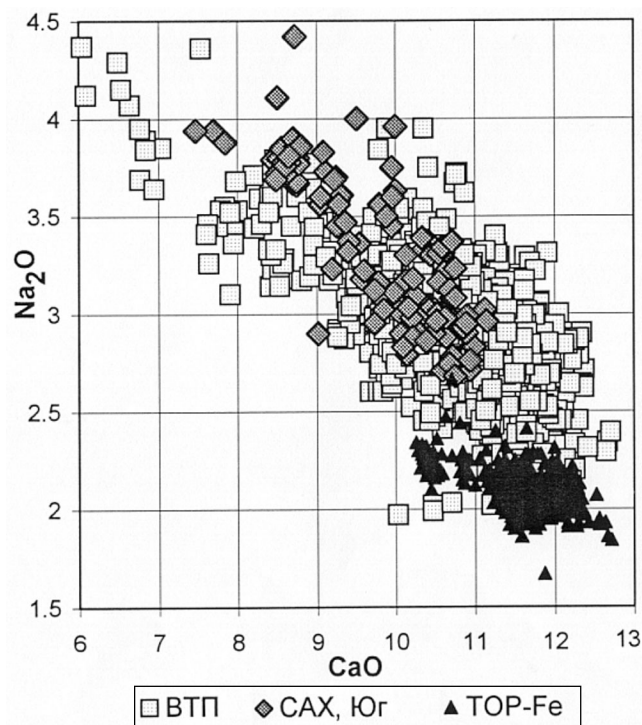


**Рис. 5.** Котектическая кристаллизация ТОР северной части САХ и ВТП, содержащих более 11% FeO в координатах K<sub>2</sub>O–H<sub>2</sub>O.

принять во внимание, что эта возможность весьма ограничена, так как дискриминанта D1 была рассчитана для контрастного проявления двух разных обстановок, включающих *медленный* спрединг и локализованные в пространстве плюмы, в то время как в южной части САХ скорость спрединга увеличивается с севера на юг, а ВТП служит эталоном высокой скорости спрединга. Кроме того, ранее было показано, что, возможно, по этой причине здесь все группы ТОР распределены хаотично, а их локализация в виде протяженных провинций не установлена [Дмитриев и др., 1990].

На рис. 7 в координатах D1–Na<sub>(8)</sub> показаны вариации состава базальтов южной части САХ, ВТП и разных групп ТОР плюмовой (1) и спрединговой (2) ассоциаций северной части САХ. Граница между плюмовой (1) и спрединговой (2) ассоциациями при значении D1 = 255 отмечена вертикальными линиями. Параметр Na<sub>(8)</sub> по [Klein and Langmuir, 1987; Langmuir et al., 1992] обратно пропорционален степени частичного плавления мантии при формировании базальтов разного состава и позволяет выполнить оценочный расчет продуктивности магматизма, выраженный через мощность образующегося базальтового слоя с ошибкой ± 2 км.

Рис. 7 показывает, что по вариациям D1 и Na<sub>(8)</sub> базальты ВТП и южной части САХ перекрывают базальты северной части САХ. Видно также, что в южной части САХ и на ВТП значительно преобла-



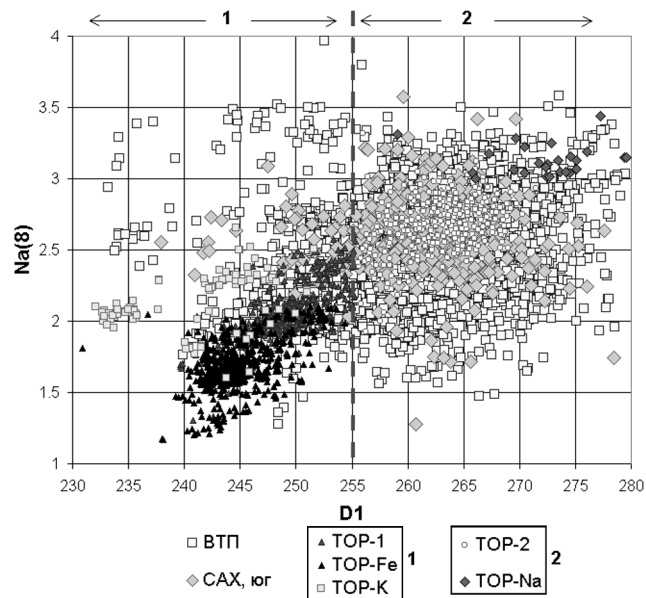
**Рис. 6.** Котектическая кристаллизация TOP северной части САХ и ВТП, содержащих более 11% FeO в координатах Na<sub>2</sub>O–CaO.

дают возможные аналоги спрединговой ассоциации северной части САХ (TOP-2 и TOP-Na). Это иллюстрируется также на гистограммах D1 для всех трех регионов (рис. 8а–в).

Среди возможных аналогов плюмовой ассоциации северной части САХ преобладают TOP-Fe и TOP-FeTi ВТП и южной части САХ, а также аналоги TOP-K (нижняя часть поля плюмовой ассоциации). Кроме того, здесь присутствует небольшая группа субщелочных базальтов ВТП сильно обогащенных калием, занимающих верхнюю часть поля, и показанных на рис. 9. Детальная характеристика этих пород дается в [Batiza et al., 1996; Hekinian and Fouquet, 1985; Thompson et al., 1989].

Общим для всех трех регионов является обогащение натрием базальтов спрединговой ассоциации (или ее аналогов в южной части САХ и ВТП), что показано на рис. 10. В плюмовой ассоциации ВТП сильное обогащение натрием отмечается только для небольшой группы субщелочных базальтов, о которых говорилось выше (верхняя левая часть того же рисунка). В базальтах спрединговой ассоциации всех трех регионов также несколько повышено содержание воды (рис. 11). В плюмовых ассоциациях аномально высокое содержание воды характерно только для TOP-K и для субщелочных базальтов ВТП.

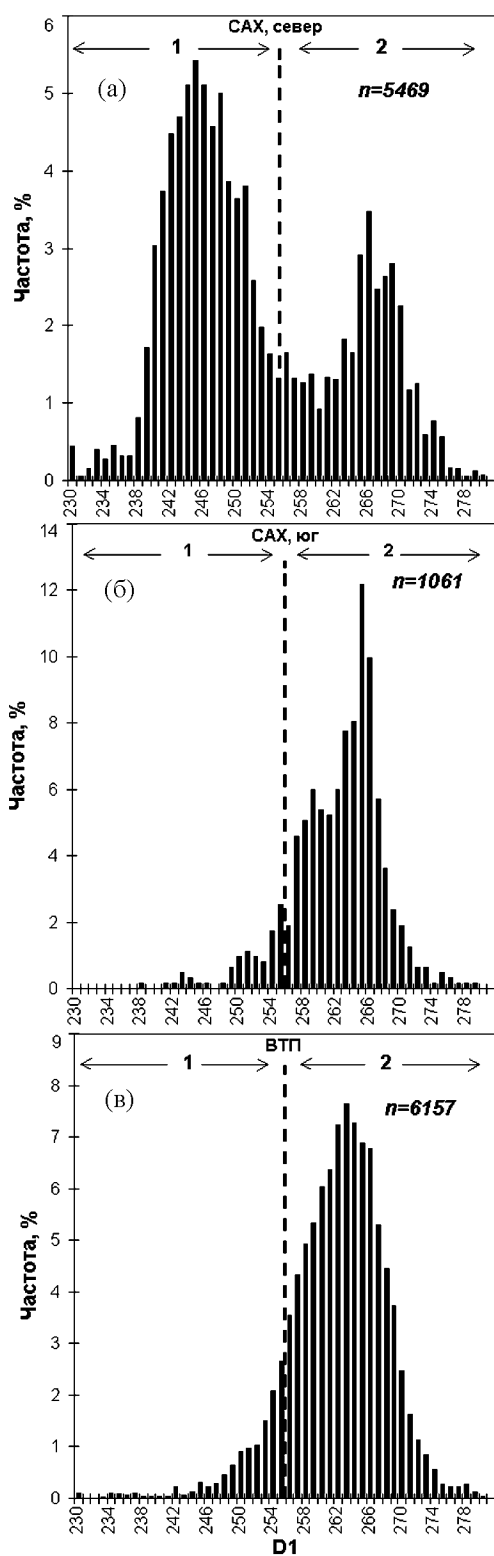
На рис. 12а на фактических данных показана связь между продуктивностью магматизма (мощность базальтового слоя) и степенью дифференциации базальтов плюмовой и спрединговой ассоциаций северной части САХ и их возможных аналогов южной части САХ и ВТП, а на рис. 12б эта же связь показана схематически. Хорошо видно, что продуктивность магматизма прямо пропорциональна степени дифференциации во всех трех сравниваемых регионах. Общим для них является также то, что продуктивность плюмовых ассоциаций выше спрединговых. Максимальная продуктивность характерна для сильно дифференцированных базальтов плюмовой ассоциации северной части САХ, а минимальная – для его спрединговой ассоциации. Последнее соответствует данным о широком распространении здесь коры Хессовского типа (кора, практически лишенная базальтового слоя, см. выше). Хорошо видно, что между полями обеих ассоциаций существует область разрыва, что подчеркивалось как результат резкого различия геодинамических обстановок медленного спрединга и развития плюмов [Дмитриев, 1998; Дмитриев и др., 1999]. В отличие от северной части САХ, в южной части САХ и на ВТП



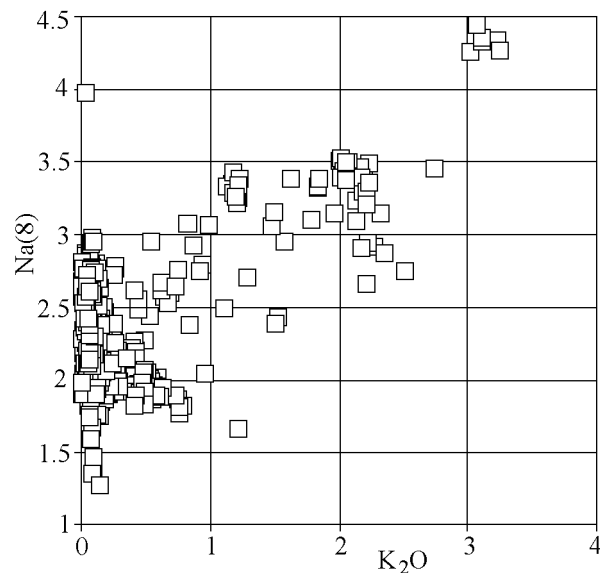
**Рис. 7.** Плюмовые и спрединговые ассоциации базальтов САХ и ВТП в координатах D1–Na<sub>(8)</sub>. Параметр Na<sub>(8)</sub> рассчитан по [Klein and Langmuir, 1987; Langmuir et al., 1992]. Граница между плюмовыми (1) и спрединговыми (2) ассоциациями показана вертикальной штриховой линией (см. рис. 8, 10, 11).

$D1 = 2,36 \text{ SiO}_2 + 15,61 \text{ TiO}_2 + 1,35 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0,80 \text{ FeO} - 3,17 \text{ MnO} + 3,19 \text{ MgO} + 2,34 \text{ CaO} + 21,35 \text{ Na}_2\text{O} - 29,15 \text{ K}_2\text{O}$  [Дмитриев и др., 1999].





**Рис. 8.** Гистограммы значений дискриминанты D1 в % для базальтов САХ и ВТП. (а) – северная часть САХ, (б) – южная часть САХ, (в) – ВТП. Вертикальной штриховой линией показана граница между плюмовыми и спрединговыми ассоциациями базальтов.

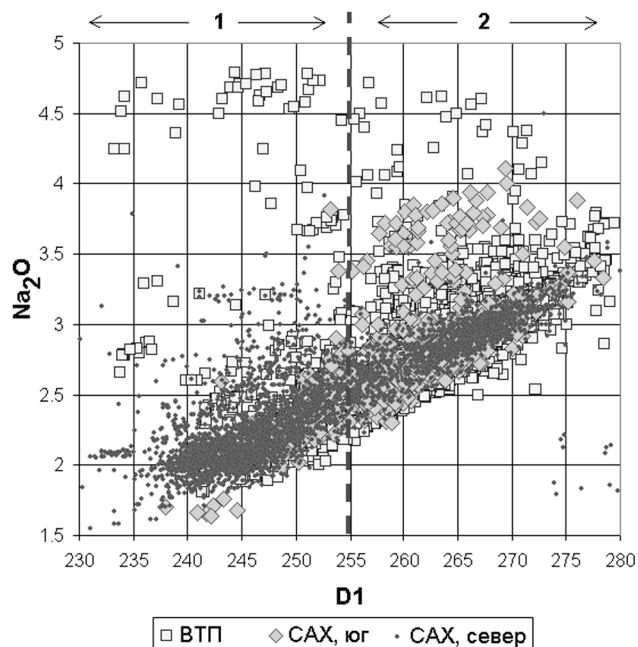


**Рис. 9.** Состав группы субщелочных базальтов ВТП в координатах  $K_2O-Na_{(8)}$ .

продуктивность магматизма при переходе от спрединговых ассоциаций к плюмовым возрастает постепенно и области разрыва между ними не образуются. Это соответствует данным о разном характере распределения одноименных групп ТОР в пространстве северной и южной частей САХ и ВТП (локализованные провинции при низкой скорости спрединга и мозаичное, хаотическое – при переменной или высокой скорости [Дмитриев и др., 1990, 1994]. Можно видеть также, что продуктивность спредингового магматизма в южной части САХ выше, чем в северной и ниже, чем на ВТП. Примеры сосуществования разных серий ТОР в ограниченном пространстве по простиранию ВТП (10–20 км) показаны на рис. 13.

Здесь видно, что на участке от 9,49° до 9,65° с.ш. (около 15 км) размещены две серии с разным интервалом фракционирования, на участке 44,1°–44,8° с.ш. (около 60 км) сосуществуют продукты внутрикамерной дифференциации и продукты полибарического фракционирования. Видно также, что выходы субщелочных базальтов расположены в интервале 12,71°–12,76° с.ш. (5 км) и между 51,35°–51,55° с.ш. (20 км). Такие узкие интервалы одновременного формирования разных серий ТОР в северной части САХ встречаются крайне редко.

На рис. 14а в координатах широта – мощность базальтового слоя иллюстрируется упорядоченное распределение плюмовых и спрединговых ассоциаций ТОР в северной части САХ, и менее упорядоченное распределение их аналогов в южной части САХ. Разный вид распределения этих ассоциаций



**Рис. 10.** Базальты плюмовой (1) и спрединговой (2) ассоциаций САХ и ВТП в координатах D1–Na<sub>2</sub>O. Вертикальной штриховой линией показана граница между плюмовыми и спрединговыми ассоциациями базальтов.

ций подчеркивается профилем аномалии силы тяжести в свободном воздухе (мГал) вдоль осевой зоны хребта, рассчитанным с разрешением 2' по [McAdoo and Laxon, 1997; Sandwell and Smith, 1997]. Профиль в основном отражает характер рельефа рифтовой долины. В северной части САХ сильно расчлененный рельеф устойчиво коррелирует с мощностью базальтового слоя, с распределением плюмовых и спрединговых ассоциаций ТОР и с профилем аномалии силы тяжести [Дмитриев и др., 1999]. Примечательно, что недавно такие же закономерности были установлены при сопоставлении районов низкоскоростного (САХ 24–29° с.ш.) и сверхнизкоскоростного спрединга (хребет Гаккеля) [Астафурова и др., настоящий сборник].

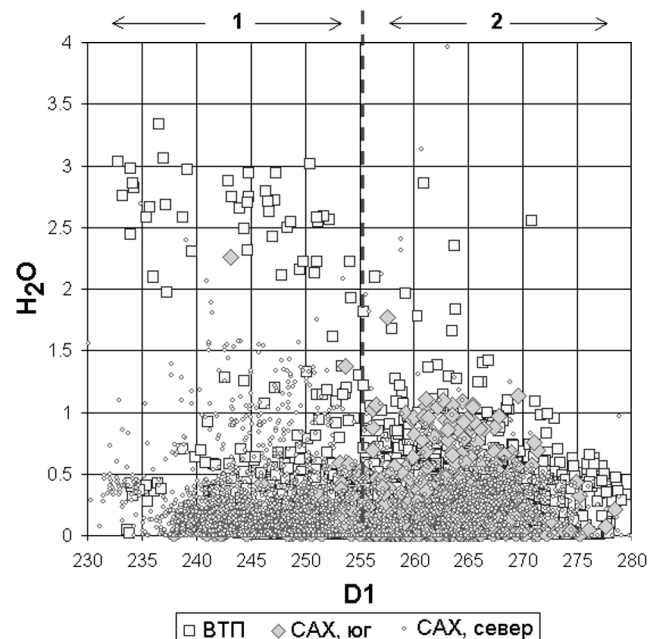
В южной части САХ рельеф рифтовой долины более сглаженный, а надежная корреляция между упомянутыми выше параметрами не устанавливается. Примеры мозаичного (хаотического) совмещения аналогов плюмовых и спрединговых ассоциаций ТОР в узком пространстве по простиранию ВТП показаны на рис. 14б (для всего хребта) и на рис. 15 (более детально для отрезка длиной 10°). На этих рисунках видно, что рельеф рифтовой долины еще более сглаженный, а корреляция между мощностью

базальтового слоя, распределением аналогов плюмовых и спрединговых ассоциаций и профилем аномалии силы тяжести практически отсутствует. Вместе с тем просматривается некоторое сходство САХ и ВТП, выраженное в том, что в северных частях обоих регионов преобладают плюмовые ассоциации ТОР, а рельеф становится более пересеченным.

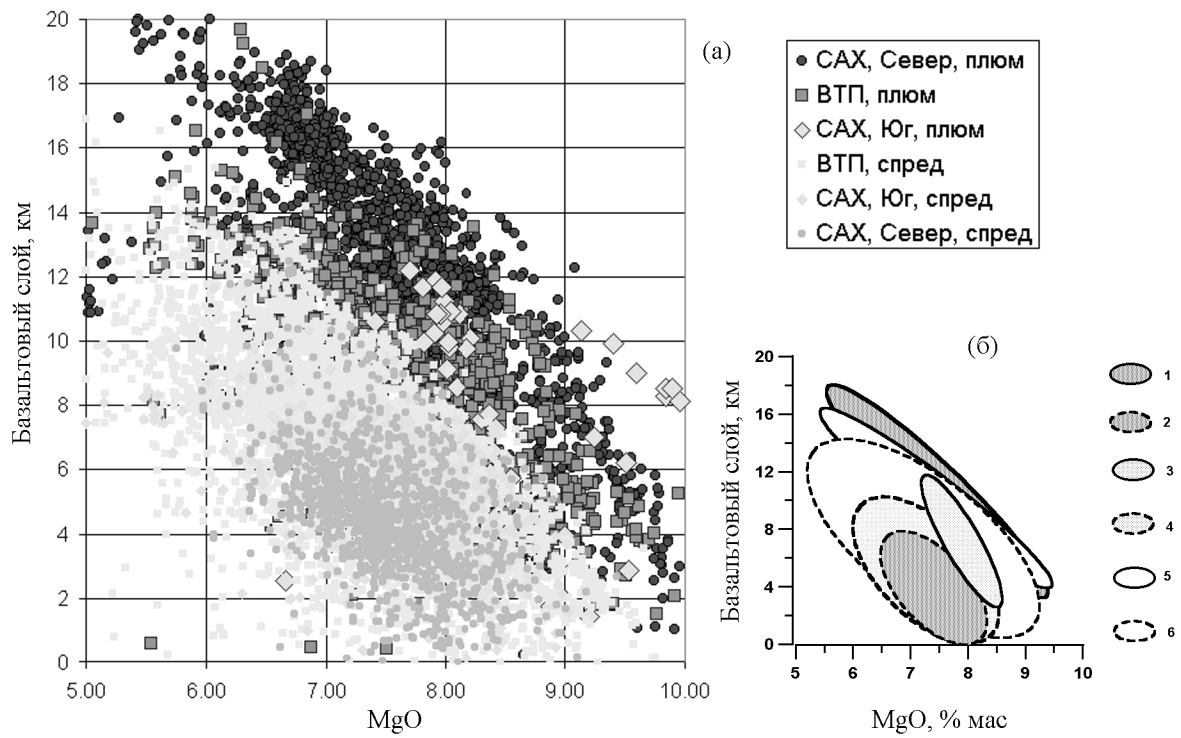
Из этих примеров следует, что скорость спрединга, продуктивность магматизма, размещение в пространстве разных ассоциаций ТОР, формирование рельефа и гравитационного поля САХ и ВТП функционально связаны между собой. Сопоставление трех регионов, выполненное, в основном, путем сравнения графического материала, не противоречит данным о средних содержаниях главных петрогенных элементов и значениям их дисперсий (табл. 1).

## Обсуждение результатов

Для сравнения особенностей базальтового магматизма, развивающегося в условиях разной скорости спрединга, были выбраны три региона: северная часть САХ (низкая скорость спрединга), южная часть САХ (переменная скорость спрединга – от низкой до умеренной) и ВТП с хребтами Горда и Хуан де Фука (от умеренной до высокой).



**Рис. 11.** Базальты плюмовой (1) и спрединговой (2) ассоциаций САХ и ВТП в координатах D1–H<sub>2</sub>O. Вертикальной штриховой линией показана граница между плюмовыми и спрединговыми ассоциациями базальтов.



**Рис. 12.** а – Изменения продуктивности магматизма, выраженной через рассчитанную мощность базальтового слоя (см. текст) при дифференциации плюмовых и спрединговых ассоциаций САХ и ВТП; б – схематизированное представление. Обозначения. Северная часть САХ: 1 – плюмовая ассоциация, 2 – спрединговая ассоциация; южная часть САХ: 3 – плюмовая ассоциация, 4 – спрединговая ассоциация; ВТП: 5 – плюмовая ассоциация, 6 – спрединговая ассоциация.

Основные результаты сопоставления фактического материала по магматизму этих регионов сводятся к следующему.

Несомненно, базальты ВТП и южной части САХ имеют определенное сходство по вариациям состава и по условиям эволюции. По этим признакам они значительно отличаются от базальтов северной части САХ. Первые по сравнению со вторыми заметно обогащены натрием и титаном – элементами, характерными для спрединговой ассоциации северной части САХ. Этому соответствуют данные о резком преобладании в южной части САХ и на ВТП аналогов спрединговой ассоциации. Для базальтов северной части САХ характерно повышенное содержание кремнекислоты и кальция – элементов преобладающей здесь плюмовой ассоциации.

Базальты южной части САХ и ВТП кристаллизуются в значительно более широком интервале давления и температуры по сравнению с базальтами северной части САХ. Это находит отражение в том, что в последних несколько повышено содержание магния (табл. 1).

Существенное различие сравниваемых регионов

состоит в том, что внутрикамерная дифференциация в южной части САХ и ВТП происходит в более широком диапазоне давления при повышенном содержании воды относительно северной части САХ. Здесь образуются ТОР-FeTi, которые практически отсутствуют в северной части САХ. Можно предположить также, что магматические камеры на ВТП и в южной части САХ более развиты и располагаются в заметно большем интервале глубины по сравнению с северной частью САХ.

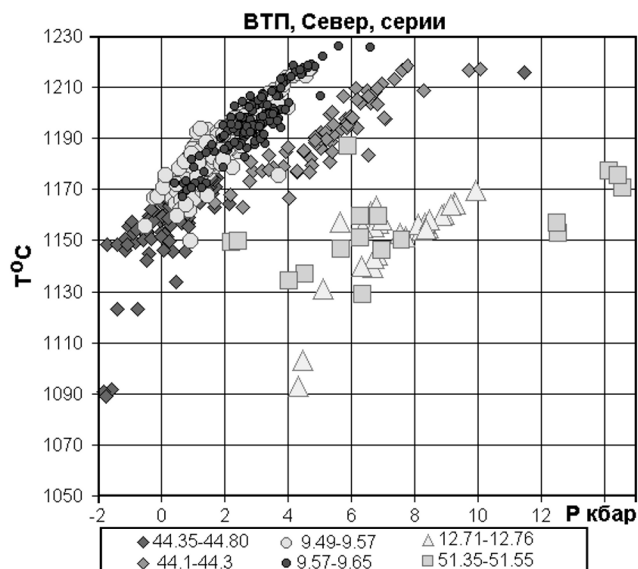
Во всех трех регионах присутствуют редкие, сильно локализованные в пространстве обогащенные базальты. В северной части САХ они представлены дифференцированными ТОР-К плюмовой ассоциации (обогащенные калием толеитовые базальты (Т-и Е-туре по [Wilson, 1989]). В южной части САХ и на ВТП их возможные аналоги кроме ТОР-К включают субщелочные базальты, сильно дифференцированные в условиях повышенного содержания воды. Эти породы также принадлежат к аналогам плюмовой ассоциации.

Необходимо отметить, что при несомненном сходстве базальтов южной части САХ и ВТП, и их отли-

**Таблица 1.** Средние содержания главных элементов (в числителе) и величины их дисперсии (в знаменателе) для трех сравниваемых регионов

	САХ, север			САХ, юг			ВТП		
	Все N=5469	Плюм N=3365	Спред N=2104	Все N=1062	Плюм N=112	Спред. N=950	Все N=6158	Плюм N=746	Спред. N=5412
SiO <sub>2</sub>	$\frac{50,79}{0,74}$	$\frac{50,88}{0,66}$	$\frac{50,64}{0,47}$	$\frac{50,67}{0,46}$	$\frac{50,36}{0,88}$	$\frac{50,76}{0,43}$	$\frac{50,42}{1,01}$	$\frac{50,25}{1,06}$	$\frac{50,44}{1,00}$
TiO <sub>2</sub>	$\frac{1,36}{0,13}$	$\frac{1,24}{0,09}$	$\frac{1,60}{0,10}$	$\frac{1,64}{0,23}$	$\frac{1,29}{0,18}$	$\frac{1,64}{0,23}$	$\frac{1,72}{0,18}$	$\frac{1,47}{0,17}$	$\frac{1,75}{0,17}$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{15,18}{0,70}$	$\frac{14,99}{0,73}$	$\frac{15,54}{0,43}$	$\frac{15,31}{0,70}$	$\frac{15,72}{0,74}$	$\frac{15,31}{0,64}$	$\frac{14,84}{1,22}$	$\frac{15,29}{1,94}$	$\frac{14,78}{1,09}$
FeO	$\frac{10,01}{1,68}$	$\frac{10,25}{2,26}$	$\frac{9,88}{0,70}$	$\frac{10,04}{1,37}$	$\frac{9,46}{0,94}$	$\frac{9,93}{1,14}$	$\frac{10,60}{2,15}$	$\frac{10,15}{2,12}$	$\frac{10,67}{2,12}$
MgO	$\frac{7,63}{0,81}$	$\frac{7,61}{0,83}$	$\frac{7,53}{0,34}$	$\frac{7,39}{1,31}$	$\frac{8,12}{1,09}$	$\frac{7,40}{1,30}$	$\frac{7,25}{1,03}$	$\frac{7,45}{1,61}$	$\frac{7,23}{0,94}$
CaO	$\frac{11,75}{0,71}$	$\frac{12,04}{0,62}$	$\frac{11,24}{0,21}$	$\frac{11,22}{0,87}$	$\frac{11,84}{0,85}$	$\frac{11,20}{0,82}$	$\frac{11,49}{0,89}$	$\frac{11,64}{1,97}$	$\frac{11,47}{0,74}$
Na <sub>2</sub> O	$\frac{2,44}{0,19}$	$\frac{2,20}{0,06}$	$\frac{2,88}{0,04}$	$\frac{2,82}{0,16}$	$\frac{2,36}{0,16}$	$\frac{2,85}{0,12}$	$\frac{2,78}{0,13}$	$\frac{2,54}{0,44}$	$\frac{2,81}{0,08}$
K <sub>2</sub> O	$\frac{0,18}{0,05}$	$\frac{0,20}{0,03}$	$\frac{0,14}{0,01}$	$\frac{0,21}{0,06}$	$\frac{0,19}{0,05}$	$\frac{0,19}{0,06}$	$\frac{0,18}{0,05}$	$\frac{0,31}{0,30}$	$\frac{0,16}{0,01}$
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$\frac{0,09}{0,05}$	$\frac{0,12}{0,01}$	$\frac{0,14}{0,01}$	$\frac{0,14}{0,01}$	$\frac{0,11}{0,01}$	$\frac{0,18}{0,01}$	$\frac{0,18}{0,01}$	$\frac{0,20}{0,03}$	$\frac{0,18}{0,01}$

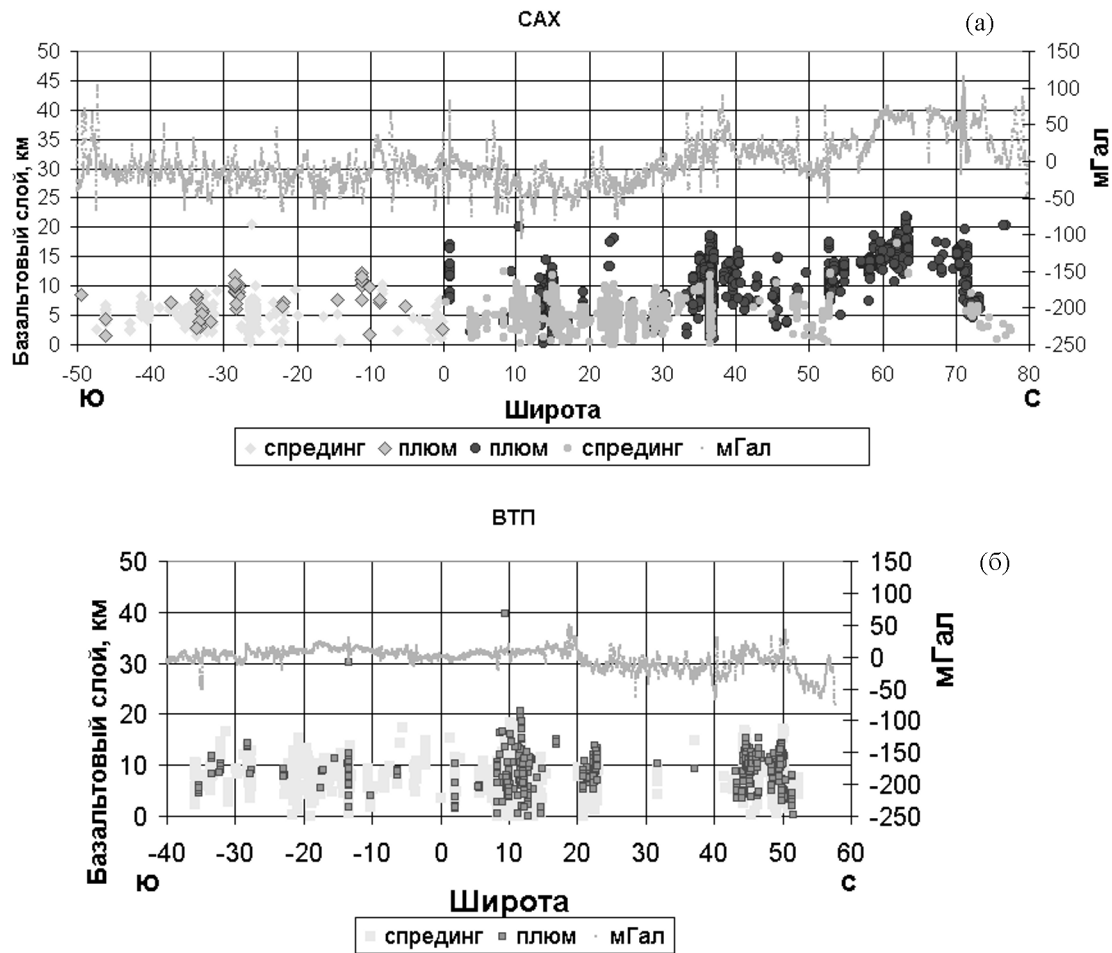
чи от базальтов северной части САХ, базальты южной части САХ занимают промежуточное положение



**Рис. 13.** Примеры совмещения разных серий ТОР в ограниченном пространстве по простиранию ВТП в координатах давление Р кбар – температура Т°С.

ние между базальтами северной части САХ и ВТП по диапазону вариаций всех упомянутых признаков. Это позволяет сделать вывод о том, что скорость спрединга и условия эволюции магматизма функционально связаны между собой. При низкой скорости спрединга (северная часть САХ) вариации состава базальтов ограничены, а их дифференциация происходит в сравнительно узком интервале РТ условий. При возрастании скорости спрединга (южная часть САХ) диапазон составов базальтов и РТ условий их дифференциации увеличиваются, а при высокой скорости спрединга (ВТП) достигают максимума.

О сходствах и различиях динамики магматизма в сравниваемых регионах позволяют судить данные о его продуктивности, рассчитанные по степени частичного плавления мантийного источника [Klein and Langmuir, 1987; Langmuir et al., 1992] и выраженные через мощность образующегося базальтового слоя. Как было показано выше, сходство всех трех регионов, несмотря на то, что они формируются при разной скорости спрединга, состоит в том, что в целом продуктивность магматизма при формировании плюмовых ассоциаций базальтов выше, чем при спрединге. Это согласуется с представлением о природе плюмов, развивающихся в условиях интенсивного подъема вещества мантии в холодной



**Рис. 14.** Плоские проекции осевой зоны САХ (а), ВТП (б) с данными о распределении мощности базальтового слоя плюмовых и спрединговых ассоциаций базальтов, рассчитанной по параметру  $Na_{(8)}$  [Klein and Langmuir, 1987; Langmuir et al., 1992] и данными о значениях аномалии Фая по [McAdoo and Laxon, 1997; Sandwell and Smith, 1997].

литосфере. В данном случае этот подъем мог происходить на фоне равномерного мантийного апвеллинга, связанного со спредингом. Вместе с тем в качестве различия сравниваемых регионов отмечалось, что в северной части САХ переход от спрединговых ассоциаций к плюмовым сопровождается резким увеличением продуктивности магматизма (существование области разрыва значений продуктивности), тогда как в южной части САХ и на ВТП этот переход осуществляется постепенно. Это дает основание предположить, что при низкой скорости спрединга плюмы образуются в ходе независимого процесса, сходного с проявлением мантийных струй, и наложенного на умеренный мантийный апвеллинг в локализованном пространстве. Повышение скорости спрединга, вызванное увеличением интенсивности подъема мантии, приводит к уменьшению раз-

ницы между скоростью подъема мантийных струй и апвеллингом. Следствием этого может быть постепенное исчезновение резких границ между мантийными струями и вмещающим пространством поднимающейся мантии, приводящее к хаотическому распределению пород с признаками плюмовой ассоциации. Естественно, что в этом случае увеличение продуктивности магматизма при переходе от спрединговых ассоциаций к плюмовым должно быть постепенным. Можно предположить, что при высокой скорости спрединга само представление о совмещении плюмов и спрединга утрачивает смысл, а неравномерное распределение в пространстве хребта пород с признаками соответствующих ассоциаций свидетельствует лишь о неравномерности мантийного апвеллинга при его образовании. Возможно, что при образовании ВТП наиболее интенсивный

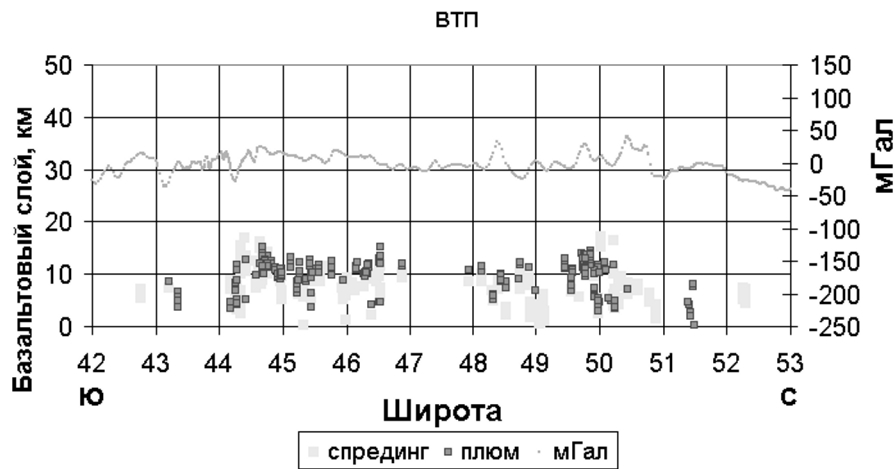


Рис. 15. Деталь рис. 146. Пояснения в тексте.

подъем мантии происходил в трех участках его северной части где сосредоточены базальты с признаками плюмовой ассоциации, распределенные в беспорядке среди базальтов с признаками спрединговой ассоциации (рис. 14, 15).

Как было отмечено выше, скорость спрединга, продуктивность магматизма, распределение в пространстве разных групп базальтов, формирование рельефа и гравитационного поля САХ и ВТП функционально связаны между собой. К этому можно добавить, что сглаженный рельеф и спокойное гравитационное поле вдоль оси рифтовой долины южной части ВТП отражают равномерный режим мантийного апвеллинга, устойчивую скорость спрединга и формирование соответствующей ассоциации базальтов (рис. 14, 15). Осложнение гравитационного поля при переходе к северной части ВТП, показанное на том же рисунке, возможно, связано с нарушением равномерного подъема мантии и с образованием базальтов с признаками плюмовой ассоциации. К отмеченному ранее сходству северных частей САХ и ВТП (связь особенностей рельефа и распространения плюмовых ассоциаций) можно добавить, что более контрастное гравитационное поле и резкие различия продуктивности магматизма в пространстве САХ по сравнению с ВТП также причинно связаны с разной скоростью спрединга в этих регионах. Отметим также, что отличие южных и северных частей ВТП может быть связано с тем, что скорость спрединга в северной части ВТП меньше, чем в южной.

Самостоятельный интерес представляет вопрос о причине различий сравниваемых регионов по вариациям состава ТОР и по степени их дифференциации. Фундаментальная разработка этого вопроса требует специального исследования, включающего прямую реконструкцию состава мантийного источ-

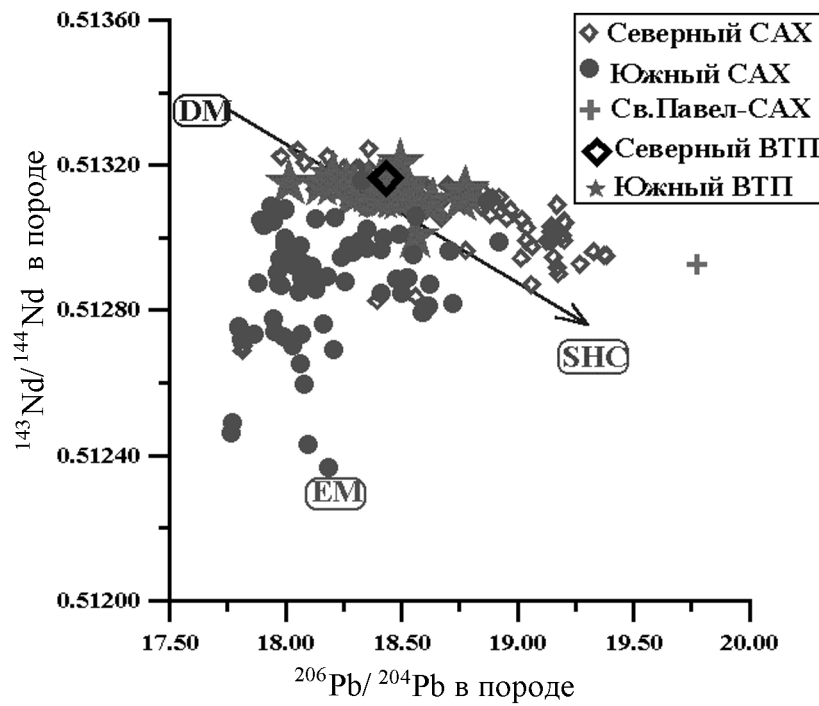
ника расплавов и специальное определение состава и условий образования первичного расплава базальтов южной части САХ и ВТП. Здесь мы остановимся лишь на ряде предположений.

Вряд ли состав мантии под САХ и ВТП существенно различается. Об этом свидетельствует близкий набор одноименных групп ТОР обоих океанов, что обсуждалось ранее в [Дмитриев и др., 1990, 1994]. Однако, как это было показано в данной работе, есть определенные черты сходств и различий во всех сравниваемых регионах.

К наиболее существенному сходству сравниваемых регионов, вне зависимости от скорости спрединга, несомненно, относится близость состава одноименных ассоциаций базальтов. Например, спрединговые ассоциации во всех регионах обогащены натрием и титаном, а плюмовые ассоциации включают базальты с повышенным содержанием железа и титана (продукты внутрикамерной дифференциации) и редкие обогащенные базальты (Т и Е-type).

Наиболее существенные различия, непосредственно связанные со скоростью спрединга, включают разный диапазон РТ условий дифференциации и разное распределение в пространстве плюмовых и спрединговых ассоциаций. При низкой скорости спрединга дифференциация развивается в сравнительно узком интервале РТ условий, а базальты плюмовых и спрединговых ассоциаций резко обособлены в пространстве и занимают примерно одинаковый объем по простираанию хребта.

Увеличение скорости спрединга сопровождается расширением диапазона РТ условий дифференциации, резким увеличением объема спрединговых ассоциаций и исчезновением границ между плюмовыми и спрединговыми ассоциациями. Одновременно с этим происходит увеличение продуктивно-



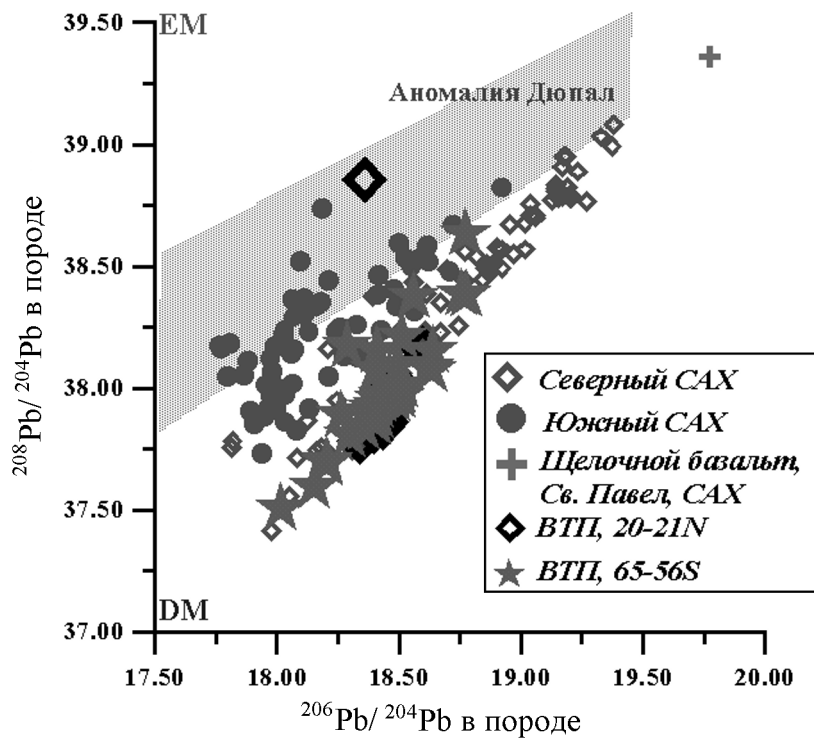
**Рис. 16.** Вариации изотопных отношений  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в базальтах южного и северного САХ и ВТП. Данные приведены по (База данных PETHDB, Колумбийского Университета, США; [Dozzo et al., 1999; Douglass and Schilling, 1999; Vlastelic et al., 1999]). DM – деплетированная мантия, SHC – компонент Св. Елены, EM – обогащенная мантия по [Hofmann, 1997]. Стрелка обозначает линию двухкомпонентного смешения для продуктов магматизма САХ по [Wilson, 1989].

сти магматизма спрединговых ассоциаций, которая становится близкой к продуктивности плюмов. В спрединговой ассоциации появляются благоприятные условия для формирования долгоживущих магматических камер в широком интервале глубины, где дифференциация может происходить при повышенном содержании воды.

К этому можно добавить, что изменение всех перечисленных признаков четко записывается в рельефе и отражается в конфигурации геофизических полей. Причинами перечисленных сходств могут быть близость состава мантийного источника базальтовых расплавов во всех трех регионах и общая петрологическая схема их эволюции.

В этой связи представляет интерес обсудить проблему геохимической природы мантийных резервуаров, питающих магматизм в трех рассмотренных регионах. По существующим представлениям продукты базальтового магматизма САХ в изотопном отношении можно рассматривать как результат смешения материала двух главных мантийных резервуаров: DM или DMM (деплетированная мантия или деплетированная мантия MORB) и HIMU или SHC (мантия с высокими величинами отношения

$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  или изотопный компонент, характерный для магматизма острова Св. Елена); в целом, то же допущение предполагается справедливым и для ВТП [Hofmann, 1997; Wilson, 1989]. В контексте проблематики настоящей статьи третий компонент смешения – FOZO [Hofmann, 1997], отражающий воздействие на эволюционные тренды мантийных источников изотопных характеристик продуктов магматизма отдельных океанических островов, не оказывает влияния на главные закономерности в распределении изотопных параметров базальтоидов из трех сравниваемых регионов, отображенные на рис. 16–18. С другой стороны, как видно из рис. 16, характерной и общей для всех базальтов САХ к югу от экватора, является их систематическое отклонение от линии двухкомпонентного смешения в область, близкую к EM (обогащенная мантия). Этот феномен позволил недавно Дж. Дуглассу и Ж. Г. Шиллингу [Douglass and Schilling, 1999] предположить, что в плюмовом магматизме хребтов Дискавери и Шона (САХ,  $40^{\circ}$ – $55^{\circ}$  ю.ш.) участвует мантийный источник, характеризующийся низким  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  и определяющий, таким образом, третий компонент смешения, свойственный только Южной Атлантике –



**Рис. 17.** Вариации изотопных отношений  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в базальтах южного и северного САХ и ВТП. Источники указаны в подписи к рис. 16. Поле аномалии Дюпал обозначено как в [Dupre and Allegre, 1983; Wilson, 1989].

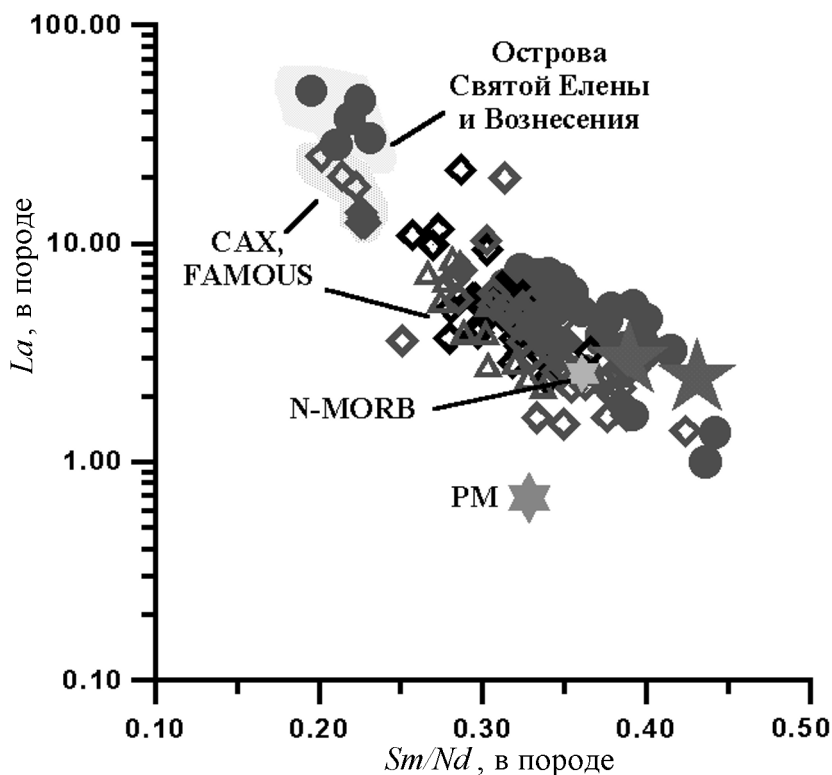
LOMU. Те же авторы считают, что мантийный субстрат с подобными изотопными характеристиками может относиться к субконтинентальной литосферной мантии, присутствующей как под акваторией Южной Атлантики, так и под Индийским океаном. Существуют данные о том, что в обогащении базальтов этой провинции принимает участие ассимиляция их расплавом вещества континентальной литосферы [Borisova et al., 2000]. Примечательно, что рис. 16 демонстрирует близость в изотопном отношении плюмовых базальтоидов Северной Атлантики (район FAMOUS) и базальтов южной части Атлантического океана. В противоположность этому, изотопные составы базальтов ВТП на рис. 16, независимо от их географического положения, сконцентрированы вдоль линии двухкомпонентного смешения. В целом, имеющиеся данные свидетельствуют о том, что базальты Южной Атлантики по своим изотопным характеристикам соответствуют базальтоидам группы Дюпал, относящихся к одноименной глобальной геохимической аномалии южного полушария, максимум которой зафиксирован именно в южной части Атлантического океана [Dupre and Allegre, 1983] (рис. 17). Из рис. 17 следует, что для ВТП базальты группы Дюпал нехарактерны (из использо-

ванной выборки лишь одна точка), что согласуется с существующими представлениями о приуроченности локальных проявлений аномалии Дюпал к островным архипелагам центральной части Тихого океана [Wilson, 1989]. Данные по распределению в базальтоидах из трех рассмотренных регионов редкоземельных элементов: La, Sm, Nd (рис. 18), с одной стороны, подтверждают обоснованный выше вывод о сходстве в степенях плавления мантийных источников, продуцирующих базальты в срединговых сегментах САХ и ВТП и о максимальных степенях плавления, присущих плюмовым регионам (на рис. 18 – район FAMOUS, САХ), с другой – свидетельствуют о возможной геохимической идентичности некоторых плюмовых ассоциаций Северной Атлантики и ВТП с продуктами базальтового магматизма Южной Атлантики (на рис. 18 – острова Св. Елены и Вознесения).

Таким образом, мантия под Южной Атлантикой характеризуется существенными изотопно-геохимическими отличиями от мантии под большей частью ВТП и Северной Атлантикой.

Из приведенного материала следует, что петрологические сходства и различия всех трех сравниваемых регионов контролируются режимом подъема





**Рис. 18.** Корреляция между содержанием La и величиной отношения Sm/Nd в базальтах южного и северного САХ и ВТП. Источники указаны в подписи к рис. 16. N-MORB и PM обозначены в соответствии с [Sun and McDonough, 1989].

мантии и условиями ее плавления, а не геохимическим типом мантийного источника. Иными словами, специфика магматизма хребтов с разной скоростью спрединга определяется геодинамической обстановкой их формирования.

Если исходить из принятого представления о скорости спрединга как функции скорости конвективного подъема мантии, то можно предположить, что при высокой скорости спрединга в формировании магматического комплекса хребта участвует значительный объем вещества мантии, поступающей с большей глубины, чем при низкой скорости. Этим можно объяснить высокую продуктивность магматизма при высокой скорости спрединга. Сходство составов базальтов спрединговых ассоциаций всех трех регионов по содержанию главных петрогенных элементов указывает на то, что РТ условия формирования их родоначальных расплавов не зависят от объема вещества мантии, поступившего в зону частичного плавления. Вместе с тем, если это вещество поступает с разных уровней глубинности мантии, то изотопный состав Nd и Pb в продуктах магматизма и содержание в них некоторых несовместимых элементов позволяет реконструировать геохимический тип мантии под срединно-океаническими

хребтами и ее вещественно-временную стратифицированность, которая не может быть восстановлена с помощью петрохимических методов.

### Заключение

Выполненное исследование позволяет сделать ряд выводов о связи между скоростью спрединга и особенностями базальтового магматизма при формировании срединно-океанических хребтов.

- Скорость спрединга, интенсивность подъема вещества мантии, продуктивность магматизма, диапазон РТ условий дифференциации базальтового расплава и распределение в пространстве хребтов разных групп базальтов функционально связаны между собой.
- Главным фактором, контролирующим соотношение перечисленных признаков, является интенсивность подъема вещества мантии.
- При формировании срединно-океанических хребтов реализуется два принципиально разных режима подъема мантии: равномерный

подъем глобального масштаба, интенсивность которого согласована со скоростью спрединга, и подъем в режиме мантийных струй, локализованный в пространстве, и связанный с образованием плюмов.

- При формировании хребтов в условиях низкой скорости спрединга развитие плюмов можно рассматривать как результат проявления независимого процесса, наложенного на равномерный мантийный апвеллинг.
- При формировании хребтов в условиях возрастающей скорости спрединга различие интенсивности подъема мантии при спрединговом режиме и при развитии плюмов постепенно уменьшается, а в условиях высокой скорости это различие может исчезнуть.
- При формировании спрединговых ассоциаций базальтов северной части САХ и ВТП вне зависимости от интенсивности мантийного апвеллинга, скорости спрединга и продуктивности магматизма, вещество мантии поступает в зону плавления с одинакового уровня глубины. Плавление мантии с образованием базальтовых расплавов спрединговой ассоциации также происходит в близком интервале РТ условий.
- С увеличением скорости спрединга возрастает продуктивность магматизма и диапазон РТ условий котектической кристаллизации базальтов, происходит обогащение водой наиболее дифференцированных разностей.
- Геохимическая природа мантийных источников магматизма Северной и Южной Атлантики и ВТП в целом не влияет на распределение провинций различных типов ТОР в Мировом океане и, по-видимому, отражает глобальную картину латерального распределения трех главных типов мантийных резервуаров: деплетированного (субокеанического), обогащенного (субконтинентального или метасоматизированного), и примитивного (неистощенного). Таким образом, петрохимические и петрологические различия и сходства базальтов Северного и Южного САХ, а также ВТП обусловлены главным образом геодинамическими факторами процессов плавления, а не геохимическим типом мантийного источника.

Выполненное исследование позволяет сформулировать ряд задач, ориентированных на его развитие в перспективе.

Необходимо прямое экспериментальное определение условий формирования родоначальных базальтовых расплавов разного состава и их эволюции. В первую очередь это относится к базальтам, обогащенным натрием и титаном, и формирующим провинции хребтов с высокой скоростью спрединга. Представляет особый интерес реконструкция условий эволюции таких базальтов при повышенном содержании воды. Необходимо также сопоставление условий формирования “натриевых” и “калиевых” базальтов (обогащенных натрием или калием) на экспериментальном уровне.

В рамках рассмотренной проблемы ключевое значение имеет сопоставление геохимических характеристик базальтоидов гребневых зон СОХ с такими в ассоциирующих с ними мантийных перидотитах.

Необходимо изучение корреляции между петрологическими и геофизическими параметрами формирования средино-океанических хребтов с разной скоростью спрединга. К числу геофизических параметров следует отнести поверхность геоида, аномалии Фая и Буге, данные о сейсмичности и о тепловом поле. Особый интерес представляет материал по глубинной сейсмической томографии вдоль простирания хребтов.

**Благодарности.** Авторы выражают признательность Л. В. Данюшевскому за возможность использования программы “PETROLOG, 98” при расчете параметров котектической кристаллизации и полезное обсуждение результатов работы. Авторы благодарны D. C. McAdoo and S. W. Laxon, любезно предоставившим данные по спутниковой альтиметрии для полярных широт САХ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 98 05 64 212, № 97 05 65 359 и № 00 05 64165 и Министерства промышленности, науки и технологий РФ, проект “Процессы в зоне гребня Срединно-Атлантического хребта” (межправительственное Российско-Американское сотрудничество по исследованию Мирового океана) и проект “Ключевые районы Срединно-Атлантического хребта” (Сотрудничество между Министерством промышленности, науки и технологий РФ и IFREMER, Франция).

## Литература

- Астафурова Е. Г., Гуревич Н. И., Даниель Е. Д., Машенков С. П., *Сопоставление особенностей аккреции океанической коры при низкоскоростном и сверхнизкоскоростном спрединге*, Наст. сборн.  
 Дмитриев Л. В., *Вариации состава базальтов средино-океанических хребтов как функция геодинамической*

- обстановки их формирования, *Петрология*, 6, (4), 340–362 1998.
- Дмитриев Л. В., Соболев А. В., Рейснер М. Г., Мелсон В. Дж., Петрохимические группы закалочных стекол ТОР (толеиты океанических рифтов) и их распределение в Атлантическом и Тихом океанах, В кн.: *Магматизм и тектоника океана*, Ред. Ю. М. Пушаровский, Наука, Москва, 43–108. 1990.
- 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, В кн.: *Нелинейная геодинамика*, Ред. Ю. М. Пушаровский, Наука, Москва, 26–54. 1994
- Дмитриев Л. В., Соколов С. Ю., Мелсон В. Г., О'Хирн, Плюмовая и спрединговая ассоциации базальтов и их отражение в петрологических и геофизических параметрах северной части Срединно-Атлантического хребта, *Российский журнал наук о Земле*, 1, (6), 457–476, 1999.
- Карасик А. М., Гордин В. М., Линейные геомагнитные аномалии Мирового океана, *Международный геолого-геофизический Атлас Атлантического океана*, МОК, ЮНЕСКО, 48 с., 1990.
- Силантьев С. А., Беляцкий Б. В., Концентрация и изотопный состав стронция, свинца и неодима в мантийных реститах Срединно-Атлантического хребта и их связь с эндогенными и экзогенными факторами аккреции океанской литосферы, *XV Симпозиум по геохимии изотопов им. академика А. П. Виноградова, тезисы докладов*, с. 260–261, Москва, 1998.
- Силантьев С. А., Базылев Б. А., Дмитриев Л. В., Плечова А. А., Петрологическая оценка геодинамических параметров мантийного диапиризма Срединно-Атлантического хребта, В кн.: *Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма*, Материалы совещания, Т. 2, с. 123–126, ГЕОС, Москва, 1999.
- Симонов В. А., Колобов В. Ю., Пейве А. А., *Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике*, 227 с., Изд. СО РАН, Новосибирск, 1999.
- Соболев А. В., *Проблемы образования и эволюции мантийных магм*, Автореферат докторской диссертации, Изд. ГЕОХИ РАН, 1997.
- Соболев А. В., Никогосян И. К., Петрология магматизма долгоживущих мантийных струй: Гавайские о-ва (Тихий океан) и о-в Реюньон (Индийский океан), *Петрология*, (2), 131–168, 1994,
- Сорохтин О. Г., Ушаков С. А., *Глобальная эволюция Земли*, 445 с., Изд. МГУ, 1991.
- Сушевская Н. М., Дмитриев Л. В., Соболев А. В., Петрохимический критерий классификации закалочных стекол океанских толеитов, *ДАН СССР*, 268, (6), 1475–1477, 1983.
- Сушевская Н. М., Удинцев Г. Б., Цехоня Т. И., Кононкова Н. Н., Генезис и геохимические особенности толеитового магматизма Срединно-Атлантического хребта (3–5° с.ш.), *ДАН СССР*, 322, (1), 147–154, 1992.
- Сушевская Н. М., Волокитина Л. П., Тектоника и магматизм приэкваториальной зоны Срединно-Атлантического хребта, *Океанология*, 35, (2) 252–265, 1995.
- Сушевская Н. М., Цехоня Т. И., Генезис толеитовых раплавов Восточно-Тихоокеанского поднятия (по данным типизации закалочных стекол), *ДАН СССР*, 326, (6), 1043–1049, 1992.
- Сушевская Н. М., Пейве А. А., Цехоня Т. И., Сколотнев С. Г., Кононкова Н. Н., Петрология и геохимия магматизма активных частей разломов Романш, Сан-Паулу и сопряженных с ними частей Срединно-Атлантического хребта, *Геохимия*, (5), 697–719, 1995.
- Сушевская Н. М., Цехоня Т. Е., Дубинин Е. П., Мирлин Е. Г., Кононкова Н. Н., Формирование океанской коры в системе срединно-океанических хребтов Индийского океана, *Геохимия*, (10), 936–975, 1996.
- Batiza R., Niu Y., Karsten J. L., Boger W., Potts E., Norby L. and Butler R., Steady and not steady state magma chambers below the East Pacific Rise, *Geophys. Res. Lett.*, (23), 221–224, 1996.
- Borisova A. Yu., Belyatsky B. V., Portnyagin M. V. and Sushchevskaya N. M., Petrogenesis of olivine-phyric basalts from Aphanasey Nikitin Rise: evidence for contamination by cratonic lower continental crust, *Petrology* (in press, 2000)
- Cannat M., Mevel C., Maia M., Deplus C., Durand C., Gente P., Agrinier P., Belarouchi A., Dubuisson G., Humler E. and Reynolds J., Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22–24°N), *Geology*, 23, 49–52, 1995.
- Danyushevsky L. V., The effect of small amount of H<sub>2</sub>O on fractionation of mid-ocean ridge magmas, *Abstr., AGU Spring Meeting*, Eos 79, #17/suppl., S375, 1998.
- Danyushevsky L. V., Soboлев A. V. and Dmitriev L. V., Estimation of pressure of crystallization and H<sub>2</sub>O content of MORB and BABB glasses: calibration of an empirical technique, *Mineralogy and Petrology*, (57), 185–204, 1996.
- Dmitriev L. V., Danyushevsky L. V., Plechova A. A. and Melson W. G., Pressure, temperature and water content regime of normal and enriched Mid-Ocean Ridge basalt fractionation along Mid-Atlantic Ridge axial zone, *The Oceanic Lithosphere and Scientific Drilling into the 21st Century, ODP-InterRidge-IAVCEI Workshop*, WHOI, USA, Abstracts, 68, 1996.
- Dosso L., Bougault H., Langmuir C., Bollinger C., Bonnier O. and Etoubleau J., The age and distribution of mantle heterogeneity along the Mid-Atlantic Ridge (31–41°N), *Earth Planet. Sci. Letters*, 170, 269–286, 1999.
- Douglass J. and Schilling J. G., Plume-ridge interactions of the Discovery and Shona mantle plumes with the southern Mid-Atlantic Ridge (40–45°S), *Journ. Geoph. Res.*, 104, (B2), 2941–2962, Feb. 1999.
- Dupre B. and Allegre C. J., Pb-Sr isotopic variations in Indian Ocean basalts and mixing phenomena, *Nature*, 303, 142–146, 1983.
- Escartin J. and Cannat M., Ultramafic exposures and the gravity signature of the lithosphere near the Fifteen-Twenty Fracture Zone (Mid-Atlantic Ridge, 14–16,5°N), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 171, 411–424, 1999.
- Hekinian R. and Fouquet Y., Volcanism and metallogenesis of axial and off-axial structures on the East Pacific Rise near 13°N, *Econ. Geol.*, (80), 221–249, 1985.
- Herzberg C. and Zhang J., Melting experiments on anhy-

- drous peridotite KLB-1; composition of magmas in the upper mantle and transitional zone, *Journ. Geophys. Res.*, *B101*, (4), 8271–8295, 1996.
- Hofmann A. W., Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism, *Nature*, *385*, 219–229, 1997.
- Klein E. M. and Langmuir C. H., Global correlation of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness, *J. Geoph. Res.*, *92*, 8089–8115, 1987.
- Langmuir C. H., Klein E. M. and 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, J. Phipps Morgan et al. (Eds.), pp. 183–280, AGU, Washington DC, 1992.
- McAdoo D. and Laxon S., Antarctic Tectonics: Constraints from a new ERS-1 Satellite Marine Gravity Field, *Science*, *276*, 5312, 25, 556–561, April 1997.
- Niu Ya. and Batiza R., Chemical Variation Trends at Fast and Slow Spreading Mid-Ocean Ridges, *J. Geoph. Res.*, *98*, (B5), 7887–7902, 1993.
- Niu Ya. and Hekinian R., Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges, *Nature*, *385*, 326–329, 23 Jan. 1997.
- Plechova A. A., High alumina-water content tholeiite – the new type of mid-ocean ridge basalt, *6th Zonenshain Conference on Plate Tectonic*, 20 p., Moscow, Abstracts, 1998.
- RIDGE Petrological Data Base, LGEO, 1999.
- Sandwell D. T. and Smith W. H., Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 satellite altimetry, *J. Geoph. Res.*, *102*, (B5), 10,039–10,054, 1997.
- Silant'ev S. A., Dmitriev L. V., Bazylev B. A., Casey J. F., Bougault H., Levsky L. K., Belyatsky B. V. and Ovchinnikova G. V., An examination of genetic conformity between co-existing basalts, gabbro, and residual peridotites from 15°20' Fracture Zone, Central Atlantic: evidence from isotope composition of Sr, Nd, and Pb, *InterRidge News*, *4*, (2), 18–21, 1995.
- Smithsonian Volcanic Glass Data File, 2000. <http://www.nmnh.si.edu/minsci/research/glass/index.htm>.
- Simonov V. A., Peyve A. A., Kolobov V. Yu., Milosnov A. A. and Kovyazin S. V., Magmatic and hydrothermal processes in the Bouvet Triple Junction Region (South Atlantic), *Terra Nova*, *8*, 45–58, 1996.
- Snow J. E., Of Hess crust and layer cake, *Nature*, *374*, 413–414, 1995.
- Sobolev A. V. and Dmitriev L. V., Primary melts of tholeiites of oceanic rifts (TOR): evidence from studies of primitive glasses and melt inclusions in minerals, 28th IGC, pp. 147–148, Washington D.C. USA, Abstracts, 1989.
- Sun S.-S. and McDonough W. F., Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt implications for mantle composition and processes, In *Magmatism in Ocean Basins*, Saunders A. D., Norry M. J. (Eds.), pp. 313–345, Geol. Soc. Spec. Publ., London 42, 1989.
- Thompson G., Bryan W. B. and Humphris S. E., Axial volcanism on the East Pacific Rise, 10–12°N, *Magmatism in the ocean basins*; Saunders A. D., Norry M. J., *Geol. Soc. Spec. Publ.*, (42), 181–200, 1989.
- Vlastelic I., Aslanian D., Dosso L., Bougault H., Olivet J. L. and Geli L., Large-scale chemical and thermal division of the Pacific mantle, *Nature*, *399*, 345–350, 1999.
- Wilson M., *Igneous Petrogenesis*, London Unwin Hyman Dostal, Boston, Sidney, Wellington, 463, 1989.

(Поступила в редакцию 16 ноября 2000.)