

## Сопоставление особенностей аккреции океанической коры при низкоскоростном и сверхнизкоскоростном спрединге

Е. Г. Астафурова, Н. И. Гуревич, Е. Д. Даниэль, С. П. Мащенко

ВНИИОкеангеология

**Аннотация.** Выполнено сопоставление основных характеристик осевых зон низкоскоростного Срединно-Атлантического хребта (САХ) в полосе Канаро-Багамского геотраверса между 24 и 29° с.ш. и юго-восточной части сверхнизкоскоростного хребта Гаккеля, Северный Ледовитый океан, между 81°16' и 84°30' с.ш. Результаты сопоставления показали, что более холодный термический режим литосферы при сверхнизкоскоростном спрединге, по сравнению с низкоскоростным, связанный с уменьшением количества поставляемого из мантии расплава, приводит: к преобладанию режима тектонического растяжения и более редким проявлениям вулканических центров у оси хребта Гаккеля по сравнению с САХ; к более широкой и глубокой, чем у САХ, рифтовой долине хребта Гаккеля, которую местами, из-за явно выраженной неравномерности магматического снабжения, могут заполнять вулканические постройки; к отличиям в стиле геоморфологической сегментации, заключающимся в отсутствии свойственных САХ смещений рифтовой долины и ее днища вблизи границ сегментов у хребта Гаккеля и в различиях в форме рельефа для вдольосевого профиля глубин хребтов Гаккеля и САХ; к утонению земной коры и иным закономерностям вдоль осевых вариаций ее мощности у хребта Гаккеля по сравнению с корой САХ. Указанные различия находят отражение в характере геофизических полей. В большинстве сегментов хребта Гаккеля, в связи с незначительными изменениями мощности коры, отсутствуют типичные для САХ вариации мантийных аномалий Буге, в то время как в тех сегментах, где имеются вулканические центры, диапазон изменения МАБ, а следовательно и мощности коры, может быть значительно больше, чем у САХ. Связь между аномальным магнитным полем и вулкано-тектоническим режимом у хребта Гаккеля более сложная, чем у САХ.

На протяжении последних 15 лет во ВНИИОкеангеология проводятся исследования геоморфологических особенностей и геофизических полей осевых зон срединно-океанических хребтов (СОХ). На основании комплексной интерпретации материалов различных геофизических съемок, с привлечением геологических данных, удалось выявить эффект относительного изменения их магматического снабжения и, как следствие, различий вулкано-тектонического режима в пространстве и времени [*Глубинное строение...*, 1998]. В последние пять лет объектами исследований явились оси низкоскоростного Срединно-

Атлантического хребта (САХ) в полосе Канаро-Багамского геотраверса (КБГТ) между 24 и 29° с.ш. длиной 650 км и сверхнизкоскоростного хребта Гаккеля (ХГ) Северный Ледовитый океан, в его юго-восточной части между 81°16' и 84°30' с.ш. длиной около 350 км. При изучении этих регионов авторы использовали оригинальные материалы, полученные ВНИИОкеангеология в совместных экспедициях с ГУНиО и организациями ассоциации "Севморгеология", а также привлекали прочие отечественные и зарубежные данные и результаты их интерпретации. Перечень и характеристика использованных материалов приведены в работах [*Глубинное строение...*, 1998; *Гуревич и др.*, 1999]. Компьютерное обобщение и обработка полученных материалов с использованием новейших технологий позволили создать согласованные базы данных, провести гридирование, получить в одних и тех же ячейках глубины

©2000 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE00046.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 15 января 2001.  
URL: <http://eos.wdcb.ru/rjes/v03/RJE00046/RJE00046.htm>

**Таблица 1.** Сопоставление основных характеристик осевых зон САХ и юго-восточной части хребта Гаккеля

№ п/п	Характеристики	Единицы измерения	Диапазон изменения характеристик	
			у оси САХ	у оси ХГ
1	Полная скорость спрединга	см/год	2,4	0,8
2	Ширина рифтовой долины	км	12÷46	37÷78
3	Максимальный возраст дна в пределах рифтовой долины	млн лет	0,5÷1,9	4,6÷8,5
4	Ширина днища рифтовой долины	км	2÷18	8÷34
5	Максимальный возраст дна в днище рифтовой долины	млн лет	0,08÷0,75	0,9÷4,3
6	Глубина днища долины	м	2850÷4700	3800÷5300 (2900÷5300)*
7	Глубина фундамента в днище долины	м	2850÷4700	4300÷5500 (3500÷5500)*
8	Глубина дна в районе рифтовых гор	м	1500÷3500	1600÷3750
9	Глубина кровли фундамента в районе рифтовых гор	м	1500÷3500	2000÷4000
10	Количество сегментов	шт.	10	6
11	Длина сегментов	км	24÷104	28÷102
12	Смещения между сегментами	км	6÷14	0
13	Высоты бортов долины:			
	а – в центре сегментов;	м	476÷2370	700÷2600
	б – у концов сегментов	м	90÷1943	400÷2000
14	Вариации глубин днища в пределах сегментов	м	100÷900	30÷2200
15	Вариации глубин кровли фундамента в пределах сегментов	м	100÷900	30÷1830
16	Интенсивность аномалии в свободном воздухе над днищем рифтовой долины	мГал	-70÷0	-40÷+22
17	Интенсивность МАБ над днищем рифтовой долины	мГал	-170÷-84	-235÷-135
18	Величина вариаций МАБ в пределах сегментов	мГал	4,5÷46	3÷35 (3÷90)*
19	Мощность коры по результатам гравитационного моделирования:			
	а – под днищем рифтовой долины;	км	4÷10	3,0÷3,8 (3,0÷7,5)*
	б – под рифтовыми горами	км	5÷10	4,5÷5,0
20	Интенсивность осевой магнитной аномалии	нТл	+66÷+794 (1) +29÷+794 (2)	-150÷+350
21	Ширина осевой магнитной аномалии	км	15,5÷34	8÷25
22	Максимальный возраст пород в источнике осевой магнитной аномалии (осевом блоке)	млн лет	0,65÷1,4	1,0÷3,1
23	Количество инверсий геомагнитного поля за время формирования осевого блока	шт.	0÷3	3÷13
24	Продолжительность полярности геомагнитного поля во время формирования осевого блока:			
	а – прямой...	млн лет	0,65÷0,78	0,78÷1,51
	б – обратной...	млн лет	0÷0,62	0,22÷1,59
25	Количество ВЦ в пределах участков	шт.	11	2
26	Количество ВЦ на 100 км длины	шт.	1,7	0,55
27	Количество ВЦ в одном сегменте	шт.	1÷2 (кроме 2 и 7 сегментов)	Только в двух сегментах по одному
28	Расстояния между ВЦ	км	13÷110	180
29	Количество сегментов в преимущественно тектоническом режиме	шт.	1 (из 10)	4 (из 6)

Примечания: \* – в скобках указан диапазон параметров с учетом осевого вулканического поднятия. (1) – максимальная интенсивность осевой магнитной аномалии, (2) – интенсивность осевой магнитной аномалии у морфологически выраженной оси центра спрединга.

дна, магнитные аномалии  $(\Delta T)_a$ , эффективную намагниченность  $J_{эф}$ , аномалии в свободном воздухе, мантийные аномалии Буге (МАБ), а на хребте Гаккеля, где проводились систематические сейсмические зондирования МОВ, и мощности осадочного чехла. Это позволило провести комплексную интерпретацию перечисленных характеристик в пределах обоих регионов [Глубинное строение..., 1998; Гуревич и др., 1999]. В данной статье проведено сопоставление этих характеристик и результатов их интерпретации между регионами (табл. 1). Сопоставление двадцати девяти характеристик, включенных в таблицу, наглядно демонстрирует основные изменения в морфологии, морфометрии, стиле сегментации, геофизических полях и вулкано-тектонических режимах при уменьшении скорости спрединга в три раза, которое предопределяет отнесение рассматриваемых участков к двум разным классам СОХ: Срединно-Атлантический хребет относится к классу низкоскоростных центров спрединга, а юго-восточная часть хребта Гаккеля – сверхнизкоскоростных.

При сопоставлении характеристик участков обоих хребтов были исключены их северные части, включавшие лишь южные концы северных сегментов. Характеристики этих участков приведены на рис. 1 и 2, на которых, в отличие от таблицы, показаны не просто диапазоны всех характеристик, а их изменения вдоль оси.

Собственно таблица и три рисунка уже позволяют понять основные отличия сверхнизкоскоростного СОХ от низкоскоростного. Поэтому ограничимся краткой пояснительной запиской к ним.

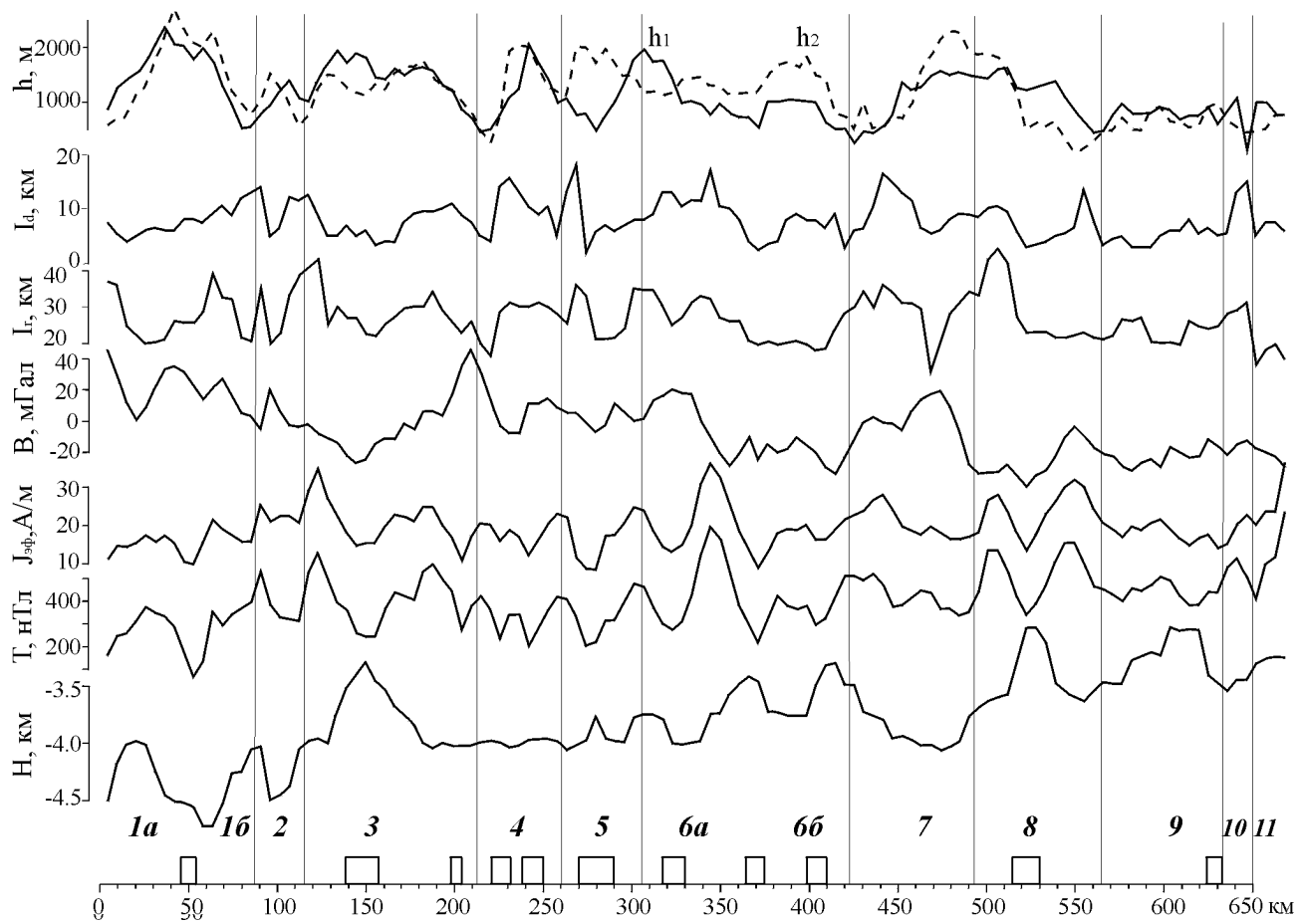
На обоих хребтах в пределах исследуемых участков четко следятся рифтовые долины и обрамляющие их рифтовые горы. Но у хребта Гаккеля рифтовая долина и ее днище значительно шире и глубже, а возрастная диапозон пород в рифтовой долине в  $4,5 \div 5$  раз больше. Обрамляющие рифтовую долину рифтовые горы также глубже у хребта Гаккеля. Особенно заметной является разница, если сравнивать глубины до кровли океанического фундамента, который на САХ совпадает с дном, а на ХГ покрыт сплошным осадочным чехлом значительной мощности, нивелирующим, но не совсем скрывающим первичный вулкано-тектонический рельеф. Большая ширина рифтовой долины хребта Гаккеля и ее днища соответствует модели рельефообразования в осевой зоне Г. Харпера [Harper, 1985], согласно которой при опускании границы “хрупкое/пластичное состояние”, определяемой изотермой  $750^\circ\text{C}$ , возникает более широкая рифтовая долина. Большая глубина изотермы  $750^\circ\text{C}$  на ХГ связана с холодным термическим режимом, который, по результатам исследований Дж. Боуна и Р. Уайта [Bown and White,

1994], свойственен СОХ с полной скоростью спрединга менее  $1,5$  см/год и связан, по их мнению, с кондуктивным остыванием мантийного апвеллинга под такими хребтами, что заметно уменьшает сумму расплава, генерированного декомпрессией. С уменьшением магматического снабжения ХГ связаны и уменьшение мощности коры, и особенности вулканотектонического режима, и иной стиль сегментации.

Осевые зоны и САХ, и ХГ сегментированы (рис. 1, 2, 3). Границы сегментов и там, и там приурочены к депрессиям в рифтовых горах и в днище рифтовой долины. Исследования на КБГТ показали, что сегментация САХ является долгоживущей [Глубинное строение..., 1998]. У ХГ границы сегментов прослежены до коры возраста 18 млн лет – до границ района исследований. На обоих хребтах границы сегментов мигрируют со временем. Но у САХ у границ сегментов наблюдается смещение рифтовой долины, а у ХГ лишь изменение ее простираения. Правда, в обоих регионах к границам сегментов приурочено смещение осевой магнитной аномалии (рис. 3), что свидетельствует о смещении невулканических зон. В днище рифтовой долины ХГ типичная для САХ морфология вдольосевого профиля, с поднятием в центре сегмента и понижениями у концов, наблюдается только в двух сегментах из семи, во II и IV. Остальные четыре сегмента ХГ характеризуются волнистой слабоамплитудной формой кривой продольного профиля, однако и морфология хребта, и особенности геофизических полей в пределах этих сегментов отличаются от соседних. Отсутствие в этих сегментах поднятий дна и минимумов МАБ позволило заключить, что в них преобладает режим тектонического растяжения. У САХ подобный режим установлен только в одном сегменте из десяти [Гуревич и др., 1999]. Подобные отличия в режимах у осей хребтов связаны с более холодной литосферой ХГ.

Особенно холодную термальную структуру литосферы ХГ имеет к югу от  $82^\circ$  с.ш. Здесь, как и на супернизкоскоростном Юго-Западном Индийском хребте к востоку от зоны разлома Мелвилл [Mével and Tamaki, 1998], значительно варьируют глубины дна: во II сегменте выявлена огромная вулканическая постройка, заполняющая рифтовую долину и создающая осевое вулканическое поднятие с глубиной дна  $2900$  м и глубиной кровли фундамента  $3500$  м (аналог гор Джордан на Юго-Западном Индийском хребте); к югу от поднятия дно углубляется до  $5300$  м. Можно полагать, что в рельефе фундамента глубины днища рифтовой долины увеличиваются и к северу, и к югу от поднятия до  $5500$  м.

С менее интенсивным магматическим снабжением ХГ связано и малое количество вулканических центров (ВЦ). Поднятия в днище рифтовой долины и



**Рис. 1.** Изменение характеристик рифтовой долины САХ вдоль ее оси.

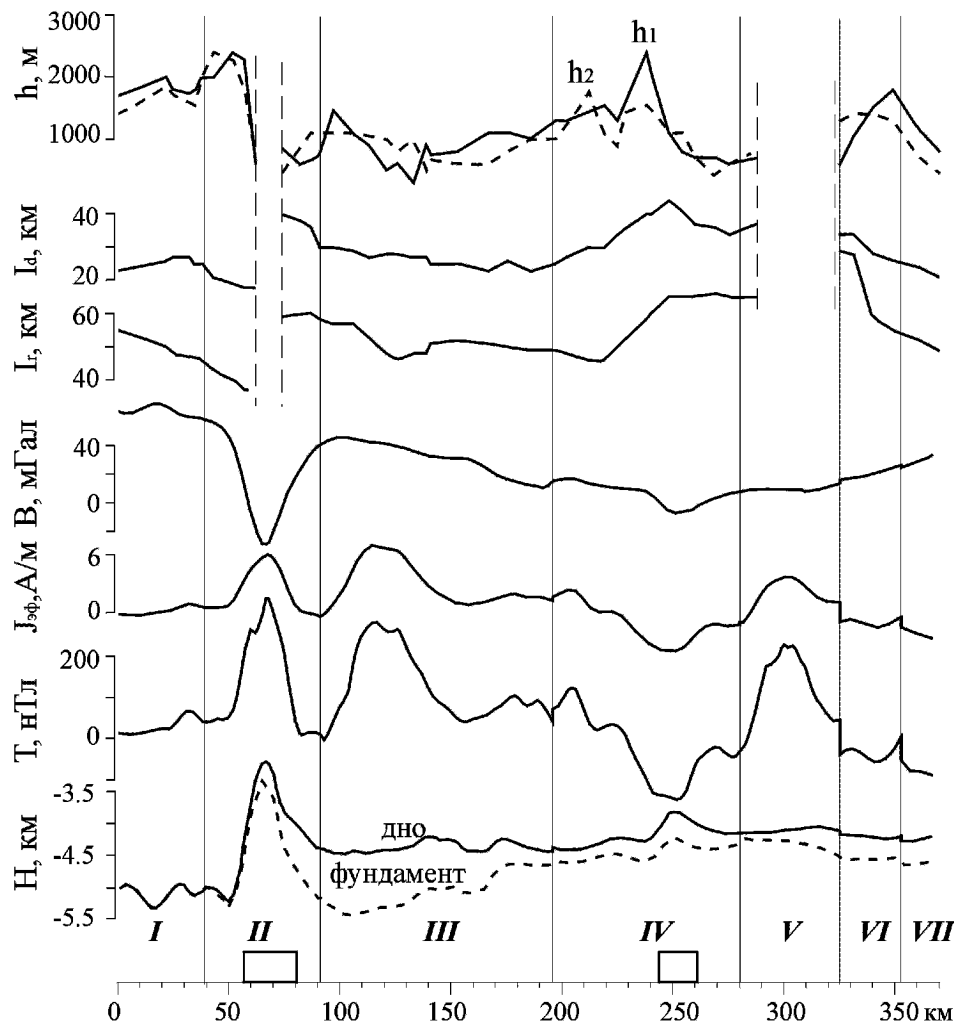
Условные обозначения:  $H$  – глубина дна рифтовой долины;  $T$  – интенсивность осевой магнитной аномалии;  $J_{\text{эф}}$  – величина эффективной намагниченности осевого блока;  $V$  – интенсивность мантийной аномалии Буге;  $I_r$  – ширина рифтовой долины;  $I_d$  – ширина дна рифтовой долины;  $h$  – высота бортов рифтовой долины:  $h_1$  – западного,  $h_2$  – восточного. Все характеристики, кроме  $I_r$  и  $I_d$ , – гридированные значения параметров.  $I_r$  и  $I_d$  САХ сняты с карты [Purdy et al., 1990]. Под графиками подписаны номера сегментов и подсегментов, у оси САХ – арабскими цифрами (по [Sempere et al., 1990] с изменениями), у оси ХГ – римскими цифрами. Прямоугольники под графиками – вулканические центры.

приуроченные к ним минимумы МАБ дали основание для выделения у ХГ двух ВЦ, один из которых совпадает с осевым вулканическим поднятием (рис. 2, табл. 1). На основании факторного анализа значительного количества морфометрических, магнитометрических и гравиметрических характеристик у оси САХ выделено 11 ВЦ (рис. 1).

Свойственное большинству сегментов САХ уменьшение интенсивности МАБ в их центрах по сравнению с концами, у ХГ наблюдается только в двух сегментах, именно в тех, где выявлены ВЦ. Это означает, что только в этих двух сегментах вдоль оси существенно изменяется мощность коры: в центральных частях, а точнее под ВЦ, мощность коры увеличивается. Данное наблюдение подтверждено плот-

ным моделированием по профилям, ориентированным вкост рифтовой долины. Максимальная мощность коры, равная 7,5 км, приурочена к осевому вулканическому поднятию.

У обоих хребтов отмечаются изменения интенсивности осевой магнитной аномалии по простиранию центра спрединга (рис. 3). Сопоставление этих изменений, а также изменений эффективной намагниченности осевого блока с вариациями морфометрических параметров рифтовой долины и МАБ вдоль оси показало связь “магнитометрической сегментации” осевой зоны САХ с морфологической и вулкано-тектонической сегментацией [Глубинное строение..., 1998; Гуревич и др., 1999]: к вдольосевым депрессиям дна, т.е. участкам, находящимся в

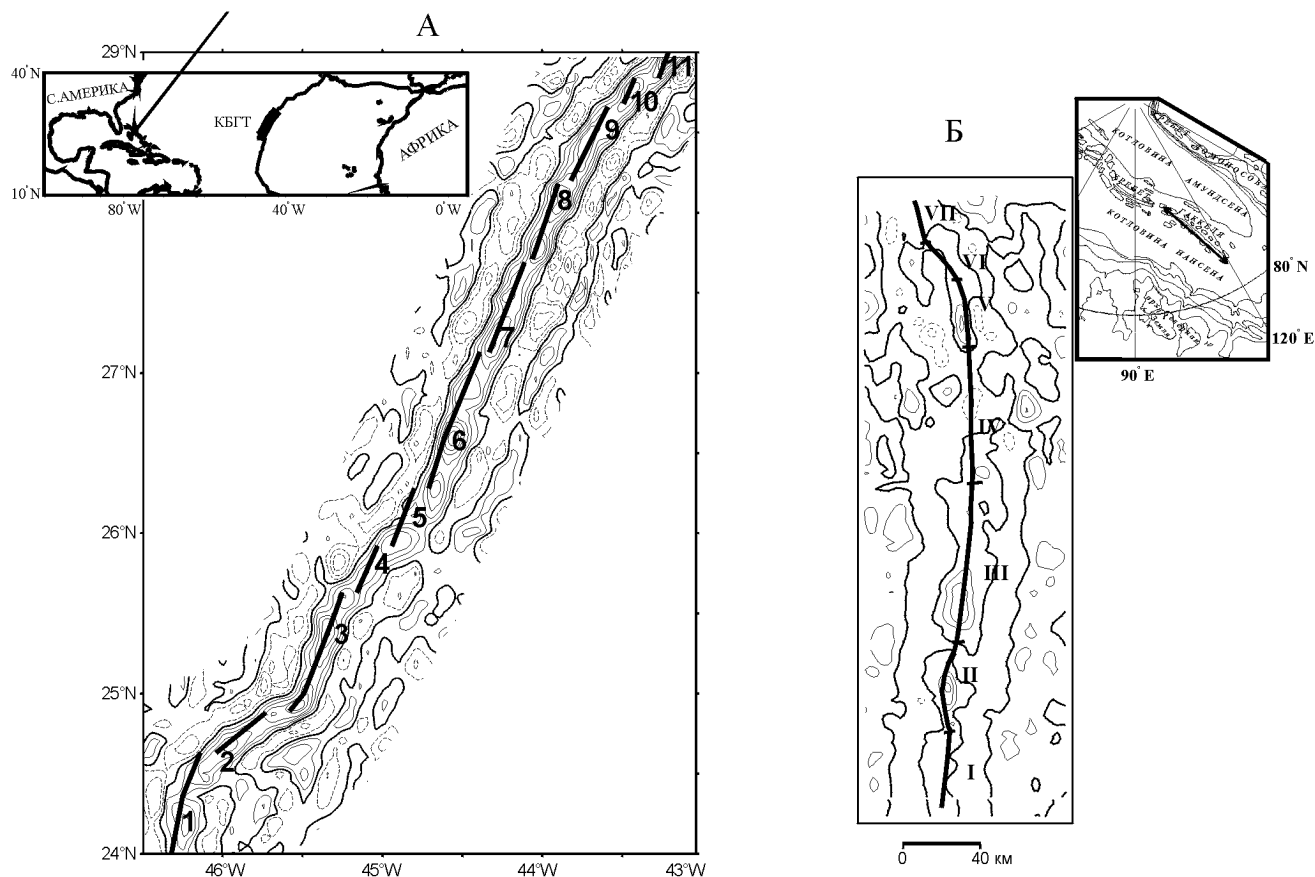


**Рис. 2.** Изменение характеристик рифтовой долины юго-восточной части хребта Гаккеля вдоль ее оси. Условные обозначения на рис. 1. Разрывы в кривых  $I_r$ ,  $I_d$  и  $h$  приурочены к участкам отсутствия морфологического проявления рифтовой долины.

режиме преимущественного тектонического растяжения, приурочены максимумы  $(\Delta T)_a$  и  $J_{эф}$ ; к вдольосевым поднятиям, являющимся вулканическими центрами, – минимумы магнитометрических характеристик (рис. 1). Причинами понижения интенсивности  $(\Delta T)_a$  и  $J_{эф}$  над ВЦ могут быть: 1) уменьшение мощности магнитоактивного слоя в результате подъема изотермы Кюри; 2) появление в днище рифтовой долины обратномагнитных пород из-за скачков неовулканической зоны, которые происходят именно в районах ВЦ при увеличении интенсивности магматического снабжения [Глубинное строение..., 1998]; 3) уменьшение намагниченности пород вследствие их низкотемпературных гидротермальных изменений. Под депрессиями, где поставка расплава уменьшается, изотерма Кюри погружается и мощность магнитоактивного слоя увеличивается.

Здесь может создаться температурный режим в литосфере, благоприятный для серпентинизации пород верхней мантии. Серпентинизированные перидотиты могут вносить вклад в осевую магнитную аномалию.

Аналогичные закономерности наблюдаются у оси ХГ к северу от осевого вулканического поднятия (рис. 2). Но, в отличие от САХ, над ВЦ IV сегмента осевая магнитная аномалия является отрицательной. Частично этот феномен может быть связан с большим количеством обратномагнитных пород у оси (см. пункты 22, 23, 24 в табл. 1). Кроме того, у оси ХГ контрастность термического режима ВЦ и соседних участков больше. Поэтому отрицательная осевая магнитная аномалия частично может появиться за счет суперпозиции минимумов от максимумов  $(\Delta T)_a$  вокруг ВЦ.



**Рис. 3.** Аномальное магнитное поле, А – САХ, Б – ХГ. Сечение изодинам 100 нТл. Нулевая изодинама утолщена, положительные изодинамы – сплошные линии, отрицательные – пунктирные. Утолщенной линией показано положение осей центров спрединга. Цифры около осей – номера сегментов (в соответствии с рис. 1, 2). На врезках – положение сопоставляемых районов.

Иная картина наблюдается во II и I сегментах хребта Гаккеля. Над осевым вулканическим поднятием закартирован максимум  $(\Delta T)_a$ . То, что максимум сохраняется и в  $J_{эф}$ , свидетельствует, что не рельеф является его причиной. Можно предположить, что природа максимумов магнитометрических параметров над этим ВЦ та же, что над ВЦ высокоскоростного Восточно-Тихоокеанского поднятия [Гуревич, Литвинов, 1995]: меньшая степень низкотемпературного окисления титано-магнетита в базальтах из-за большей монолитности коры и/или повышенная намагниченность пород, связанная с особенностями их аккреции. К югу от осевого вулканического поднятия, где дно рифтовой долины резко углубляется, а интенсивность МАБ увеличивается, положительная вдольосевая магнитная аномалия имеет очень низкую интенсивность. Очень холодный термический режим литосферы, которого можно ожидать в этой части оси ХГ, вероятно, препятствует серпентинизации перидотитов. Источни-

ком магнитной аномалии тут могут быть породы коры, мощность которой из-за очень низкого магмабюджета значительно понижена.

Следовательно, у оси низкоскоростного САХ существует отчетливо выраженная связь между интенсивностью осевой магнитной аномалии и вулканотектоническим режимом и судить о последнем можно по одним только вдольосевым вариациям магнитной аномалии. У оси супернизкоскоростного хребта Гаккеля при особенно холодном термическом режиме в литосфере, при котором снабжение осевого региона расплавом исключительно неравномерное, характер связи между аномальным магнитным полем и режимом становится иным. Чтобы определить вулканотектонический режим у оси супернизкоскоростного СОХ, требуется комплексный анализ магнитометрических, батиметрических и гравиметрических данных.

Таким образом, сопоставление основных характеристик осевых зон низкоскоростного САХ в полосе

КБГТ и юго-восточной части сверхнизкоскоростного хребта Гаккеля показало, что более холодный термический режим литосферы при сверхнизкоскоростном спрединге, по сравнению с низкоскоростным, связанный с уменьшением количества поставляемого расплава, приводит:

- к преобладанию режима тектонического растяжения и более редким проявлениям вулканических центров у оси хребта Гаккеля по сравнению с САХ;

- к более широкой и глубокой, чем у САХ, рифтовой долине хребта Гаккеля, которую местами, из-за неравномерности магматического снабжения, могут заполнять вулканические постройки;

- к отличиям в стиле сегментации, заключающимся в отсутствии свойственных САХ смещений рифтовой долины хребта Гаккеля и ее днища у границ сегментов и в отклонении вдольосевого профиля глубин в большинстве сегментов хребта Гаккеля от профиля, типичного для САХ;

- к утонению коры и иным закономерностям вдольосевых вариаций ее мощности у хребта Гаккеля по сравнению с корой САХ.

В результате происходят изменения в характере геофизических полей. В большинстве сегментов хребта Гаккеля, в связи с незначительными изменениями мощности коры, отсутствуют типичные для САХ вариации мантийных аномалий Буге, в то время как в тех сегментах, где имеются вулканические центры, диапазон изменения МАБ, а следовательно и мощности коры, может быть значительно больше, чем у сегментов САХ. Связь между аномальным магнитным полем и вулканотектоническим режимом у хребта Гаккеля более сложная, чем у САХ. Интенсивность осевой магнитной аномалии и величина эффективной намагниченности осевого блока у хребта Гаккеля меньше, чем у САХ. При этом у ХГ, в отличие от САХ, и та, и другая магнитометрические характеристики могут иметь отрицательные значения. Причина этого – более широкий возрастной диапазон и большее количество обратномагнитных пород в источнике осевой магнитной аномалии, а также большая контрастность режимов у оси хребта Гаккеля.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 98-05-65600, 97-05-64407).

## Литература

- Глубинное строение и эволюция литосферы Центральной Атлантики (Результаты исследований на Канаро-Багамском геотраверсе)*, Машенков С. П., Погрещицкий Ю. Е. (ред.), 299 с., ВНИИОкеангеология, СПб, 1998.
- Гуревич Н. И., Литвинов Э. М., Магматический контроль за гидротермальным сульфидообразованием у оси Восточно-Тихоокеанского поднятия по геофизическим и геохимическим данным, *Российский геофизический журнал*, (5–6), 51–58, 1995.
- Гуревич Н. И., Абельская А. А., Шулягин О. Г., Астафурова Е. Г., Магнитометрический критерий оценки перспектив осевой зоны Срединно-Атлантического хребта на гидротермальное сульфидообразование, *Российский геофизический журнал*, (13–14), 72–79, 1999.
- Гуревич Н. И., Астафурова Е. Г., Даниэль Е. Д., Машенков С. П., Паукку С. А., Особенности аккреции коры у оси “супермедленного” хребта Гаккеля (по геофизическим и морфологическим данным), *Тезисы докладов XIII международной школы морской геологии “Геология морей и океанов”, Т. II*, с. 240–241, Москва, 1999.
- Bown J. W. and White R. S., Variation with spreading rate of oceanic crustal thickness and geochemistry, *Earth Planet Sci. Lett.*, 121, (3/4), 435–449, 1994.
- Harper G. D., Tectonics of slow spreading mid-ocean ridges and consequences of variable depth to the brittle/ductile transition, *Tectonics*, 4, (4), 395–409, 1985.
- Mével C., Tamaki K. and the FUJI Scientific Party Imaging an ultra-slow spreading ridge: first results of the FUJI cruise on the SWIR (R/v Marion Dufresne, 7/10 – 3/11/97), *Inter Ridge News*, 7, (1), 29–32, 1998.
- Purdy G. M., Sempere J. C., Schouten H. et al., Bathymetry of the Mid-Atlantic Ridge, 24–31°N: A Map Series, *Marine Geophys. Res.*, 12, 247–252, 1990.
- Sempere J. C., Purdy G. M., Schouten H., Segmentation of the Mid-Atlantic Ridge between 24°N and 30°N, *Nature*, 344, 427–431, 1990.

(Поступила в редакцию 16 ноября 2000.)