

УДК 550.361

## ПРИРОДА АСИММЕТРИИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТАХ МИРОВОГО ОКЕАНА

© 2020 г. М. Д. Хуторской<sup>1</sup>, \*, Е. А. Тевелева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия

\*e-mail: mkhutorskoy@ginras.ru

Поступила в редакцию 21.02.2019 г.

После доработки 21.02.2019 г.

Принята к публикации 18.06.2019 г.

Проведен статистический анализ распределения теплового потока вдоль девяти геотраверсов, пересекающих срединно-океанические хребты в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах. Установлена значимая асимметрия в распределении теплового потока — средние его значения различаются по разные стороны от оси хребтов. В геотраверсах южного полушария Земли их западный фланг имеет более высокое значение среднеарифметического теплового потока, а в геотраверсах северного полушария — восточный фланг. Учитываются различные тектонические факторы, приводящие к такому распределению, но универсальной причиной этой закономерности предложено считать влияние силы Кориолиса, которая при вращении планеты отклоняет восходящий поток магмы в дивергентных зонах, соответственно, к западу — в южном, и к востоку — в северном полушариях.

**Ключевые слова:** тепловой поток, геотраверсы, Мировой океан, полушария Земли, асимметрия, сила Кориолиса

**DOI:** 10.31857/S0030157420010141

Детальные исследования теплового потока в пределах склонов срединно-океанических хребтов и смежных абиссальных котловин показали, что его распределение не является везде симметричным относительно оси хребта в соответствующих однотипных зонах, а подчинено сложному механизму перераспределения, зависящему от многих геологических причин, связанных с тектоникой и особенностями строения литосферы этих зон.

Факт геотермической асимметрии склонов срединных океанических хребтов (СОХ), смежных абиссальных котловин и пассивных частей трансформных разломов в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах был обоснован и подтвержден на основании статистической обработки выборок измерений из глобальной базы данных по тепловому потоку вдоль геотраверсов, пересекающих СОХ и охватывающих перечисленные структурные элементы океанической коры [10, 11, 15–17]. Важно отметить, что асимметрия СОХ наблюдается не только в тепловом поле, но и в других геофизических полях: магнитном [2] и гравитационном [22], а также в структуре коры [7, 13].

Природа этого феномена многократно обсуждалась, и предлагались различные геолого-геофизические модели для объяснения существующей асимметрии. Некоторые исследователи отмечают

существование различной скорости спрединга океанических плит по разные стороны от оси хребтов [7, 13, 19], другие полагают, что различаются геодинамические процессы в смежных плитах, и на одной из них режим сжатия, сменивший первичную обстановку растяжения, создает характерные для сжатия шарьяжно-надвиговые структуры [11, 13].

Мы недавно предложили рассмотреть влияние силы Кориолиса [18], действующую на любую массу, которая движется вдоль радиуса вращающейся Земли и отклоняет эту массу от ортогональной траектории, соответственно, к западу в южном полушарии и к востоку — в северном. В качестве такой “массы” может рассматриваться восходящий поток магмы в дивергентных зонах срединных хребтов. Отклонение этого потока от траектории, ортогональной к поверхности планеты, обуславливает наблюдаемую геотермическую асимметрию.

Целью данной работы является сравнительный анализ распределения теплового потока вдоль геотраверсов, пересекающих СОХ в южном и северном полушариях планеты. Естественно, нами рассматриваются те пересечения СОХ, которые наиболее представительно обеспечены измерениями теплового потока. Компиляция изме-

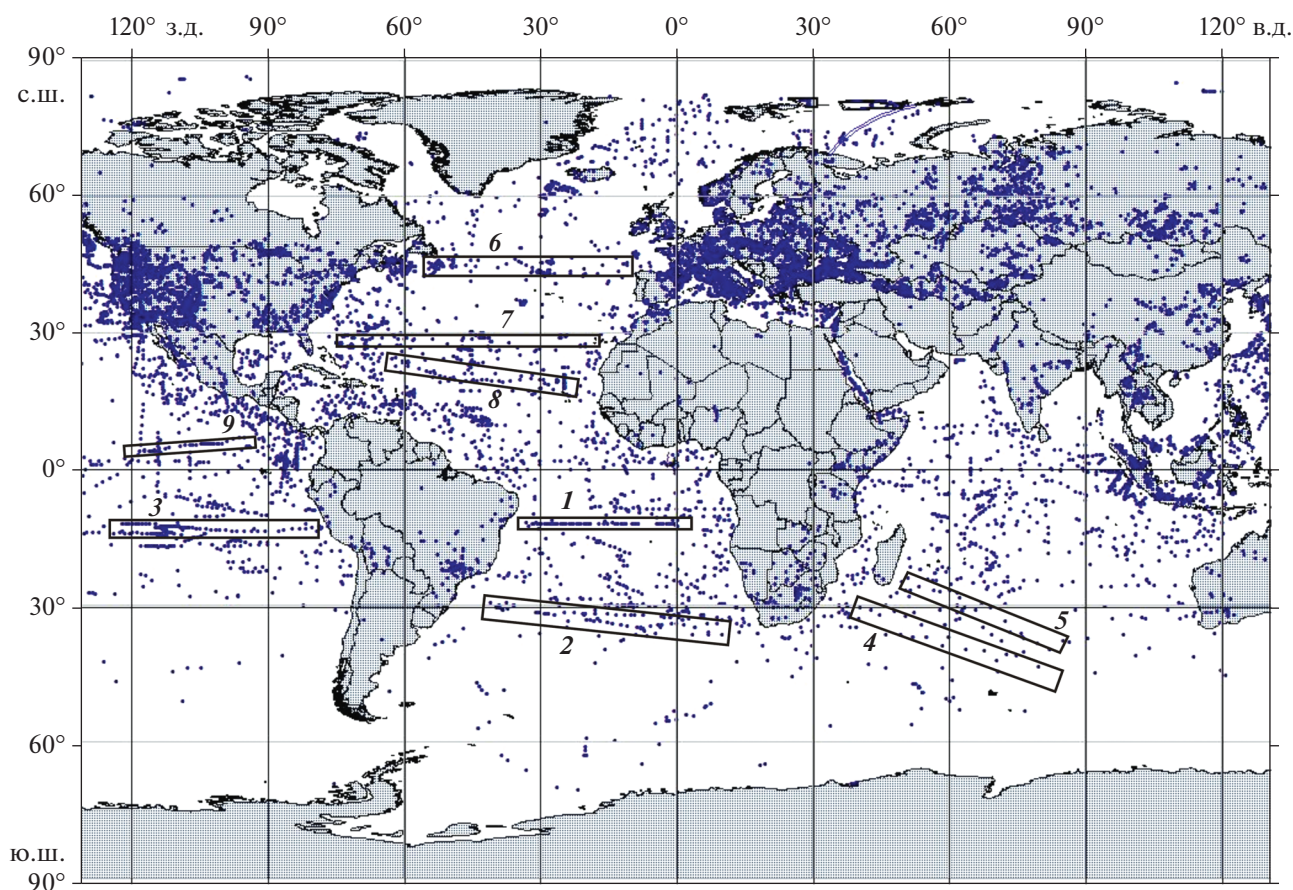


Рис. 1. Схема расположения точек измерения теплового потока и исследованных геотравверсов в Мировом океане (номера см. в тексте и в таблицах).

ренных значений теплового потока отражена в глобальных базах данных [9, 26, 29, 35].

Для установления факта геотермической асимметрии на флангах СОХ нами было проведено сравнение выборок данных теплового потока для однотипных элементов вдоль длинных профилей (геотравверсов), пересекающих хребты в Мировом океане: Срединно-Атлантический хребет (САХ), Восточно-Тихоокеанское поднятие (ВТП) и Западно-Индийский хребет (ЗИХ) (рис. 1). Статистические выборки для каждого из этих геотравверсов вполне представительны для проведения сравнительного анализа.

Доказательство возможной геотермической асимметрии структурно-морфологических элементов вдоль геотравверсов основано на статистическом сравнении выборок эмпирических данных, относящихся к разным его частям, в нашем случае, к его западному и восточному простирианию.

Для оценки статистически значимого различия средних значений теплового потока в исследуемых выборках использовался параметриче-

ский критерий Крамера–Вэлча ( $T$ ), значение которого находят по формуле [3]:

$$T = \frac{\sqrt{mn}(\bar{x} - \bar{y})}{\sqrt{ns_x^2 + ms_y^2}},$$

где  $\bar{x}$ ,  $s_x^2$ ,  $n$  и  $\bar{y}$ ,  $s_y^2$  и  $m$  соответственно выборочные средние, дисперсии и количество данных по двум сравниваемым выборкам. Если  $T < \phi\left(1 - \frac{1}{2}\right)$ ,

где  $\phi\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$  – значение обратной функции нормального распределения от уровня значимости  $\alpha$ , где  $\alpha = 1 - P$ ,  $P$  – доверительная вероятность, то принимают гипотезу об однородности средних значений теплового потока, т.е. существование асимметрии не подтверждается. Если же

$T \geq \phi\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$ , то принимают гипотезу о том, что средние значения по рассматриваемому признаку неоднородны и асимметрия подтверждается. При уровне значимости  $\alpha = 0.05$  (при  $P = 95\%$ ) крити-

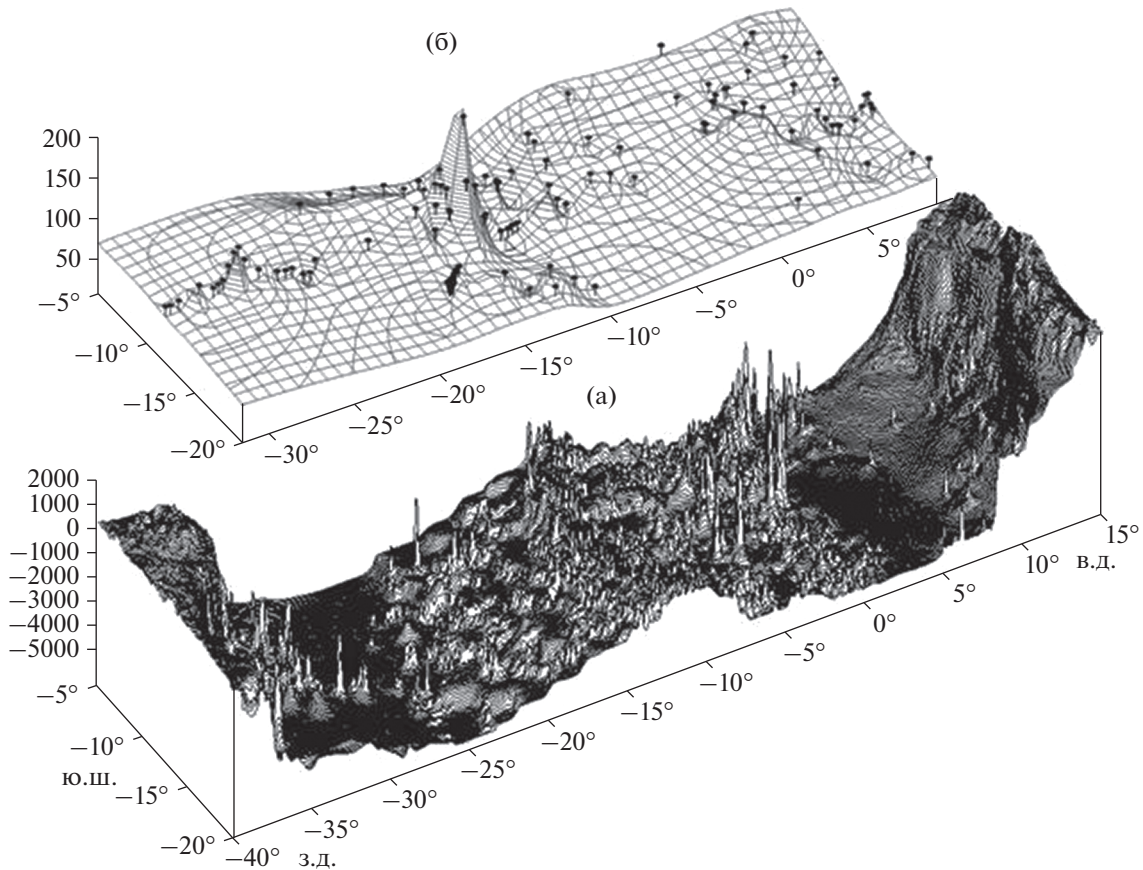


Рис. 2. Рельеф дна (а) и тепловой поток (б) вдоль Анголо-Бразильского геотраверса.

ческое значение критерия Крамера–Вэлча  $T = 1.96$ . Следовательно, если значение критерия не превышает данную величину, то следует принять гипотезу об однородности данных выборок по среднему значению. Если значение критерия больше или равно критическому значению, то выборки по среднему значению признаются различными.

### ЮЖНОЕ ПОЛУШАРИЕ ЗЕМЛИ

В южном полушарии мы проанализировали распределение теплового потока вдоль пяти геотраверсов: 1) Анголо-Бразильский геотраверс ( $12^\circ$  ю.ш.), 2) геотраверс вдоль  $31^\circ$  ю.ш. – в Атлантическом океане; 3) геотраверс  $15^\circ$  ю.ш. – в Тихом океане, а также геотраверсы в Индийском океане: 4) южная часть котловины Крозе-Мозамбикская котловина и 5) северная часть котловины Крозе-Мадагаскарская котловина (см. рис. 1).

**Атлантический океан.** Большинство геотермических данных по Анголо-Бразильскому геотраверсу (№ 1) было получено во время многолетних экспедиционных геолого-геофизических исследований ВНИИОкеангеология [5, 8, 10, 12].

В пределах Анголо-Бразильского геотраверса выполнены детальные измерения теплового потока, гравитационного и магнитного полей, рельефа дна, проведен большой объем сейсмических исследований.

Морфоструктура дна вдоль геотраверса подчиняется традиционной схеме строения трансокеанических структур [7]. В центральной части геотраверса располагается Срединно-Атлантическое поднятие, по обе стороны от которого лежат абиссальные плиты (Ангольская и Бразильская котловины) и сопряженные с плитами окраинно-материковые флексуры (Африканский и Южно-Американский континентальные склоны с подножьями) (рис. 2). Перечисленные структуры первого порядка осложнены системой подчиненных и наложенных морфоструктур: выделяются мозаично-ячеистые и линейно-грядовые поднятия, плато, трог, вулканические постройки центрального типа. Несмотря на плавные в целом сопряжения структур, продолжные относительно срединного хребта зоны контактируют по сбросам. Исходя из ландшафтных характеристик (размер, амплитуда, выдержанность ориентировки), отмечается асимметрия крыльев срединного под-

**Таблица 1.** Статистические характеристики геотраверсов в южном полушарии Атлантики

№ геотраверса запад/восток	№ 1 Анголо-Бразильский		№ 2 31° ю.ш.	
	запад	восток	запад	восток
Среднее значение теплового потока	62	39	91	61
Среднеквадратическое отклонение	25	21	94	62
Количество измерений	16	18	6	27
Значение критерия Крамера–Вэлча	3.0		0.99	
Доверительная вероятность	99%		70%	

нятия: при формировании базальтового ложа тектоно-магматическая деятельность наиболее интенсивно проявилась на западном “бразильском” крыле [8].

Строение магнитного поля западного и восточного флангов поднятия также асимметрично. Аномалии западного фланга отличаются относительно повышенной интенсивностью (до 150 нТл) и более выдержанной линейностью. Они хорошо идентифицируются до 33-й аномалии включительно. Аномалии восточного фланга характеризуются сглаженным (до 100 нТл) знакопеременным фрагментарно линейным полем, и корреляция здесь весьма условна [5]. Асимметрия в строении аномального магнитного поля западного и восточного флангов срединного поднятия устанавливается и на геомагнитном разрезе: поверхность нижних кромок намагниченных тел на западном фланге не опускается глубже 12 км, а на восточном достигает 20 км от поверхности океана.

По данным МОВ ОГТ отмечается существование структурных швов, захороненных под осадочным чехлом. На сейсмическом разрезе они выражаются в виде мощного рефлектора, проходящего через всю кору и смещающего поверхность Мохо. Хотя эти швы не выражены ни в рельефе дна, ни в гравитационном поле, в структурном плане они также дают основание предположить асимметрию обусловивших их тектонических процессов. На “Ангольском шве” наблюдается надвигание океанической литосферы по поверхности палеоконтинентального склона в сторону континента, а на “Бразильском” – литрическое сползание.

Наблюдаемая асимметрия в глубинной структуре склонов и абиссальных котловин вдоль геотраверса, а также в магнитном поле связана, естественно, с различием в энергетике геодинамических процессов, о чем можно судить на основании анализа геотермических данных. При статистической обработке и расчету критерия Крамера-Вэлча они показали значимое различие теплового потока по разные стороны САХ. Так, средний тепловой поток западнее САХ составляет 62 мВт/м<sup>2</sup>, а восточнее – 39 мВт/м<sup>2</sup> (табл. 1).

Обсуждая причины геотермической асимметрии хребта, можно в первом приближении согла-

ситься с авторами работы [8], которые объясняют ее “...отсутствием единого механизма формирования океанической литосферы” (стр. 21), но полученные нами результаты заставляют предположить наличие дополнительных глубинных термических источников, которые обусловили повышение теплового потока на западном фланге хребта в полосе геотраверса.

Можно предположить или наличие разной мощности литосферы с западной и восточной стороны хребта (в этом случае в стационарном геотермическом поле сохранятся различия фоновых значений теплового потока), или действие нестационарных и более поздних геодинамических процессов, изменивших термическую структуру уже сформировавшейся океанской литосферы.

Первое из наших предположений не согласуется с независимыми геофизическими результатами, полученными при изучении геотраверса, а также с оценками мощности литосферы по данным о батиметрии дна [6]. Второе предположение более реально, т.к. структурная неоднородность и наличие наложенных тектонических процессов в сформировавшейся литосфере подтверждается данными гравиметрии [1], магнитометрии и сейсмического профилирования.

Геотраверс вдоль 31° ю.ш. протягивается от Капской котловины на востоке до Плато Риу-Гранди – на западе Атлантического океана. В полосе геотраверса<sup>1</sup> имеется 6 измерений западнее САХ и 27 измерений – восточнее. Применяв ту же методику сравнения данных, мы рассчитали, что средний тепловой поток западнее САХ составляет 91 мВт/м<sup>2</sup>, а восточнее – 61 мВт/м<sup>2</sup>, т.е. пришли к аналогичному результату: западный фланг САХ на геотраверсах южного полушария в Атлантике обладает более высоким тепловым потоком (см. табл. 1).

Как было анонсировано выше, мы обсудим более общие и универсальные модели для объяснения наблюдаемой асимметрии теплового потока после характеристики всех геотраверсов.

<sup>1</sup> В выборку данных теплового потока включались все измерения, расположенные в полосе шириной ±2° от оси геотраверса.

**Тихий океан.** В южном полушарии Тихого океана мы рассмотрели один геотраверс, пересекающий ВТП по 15° ю.ш. ВТП представляет одно из главных звеньев глобальной цепи срединно-океанических хребтов. В юго-восточной части Тихого океана оно служит границей между литосферной плитой Пацифик на западе и плитами Антарктической, Чилийской, Наска и Кокос на востоке. Морфологически поднятие выражено в виде широкого (1000–1200 км) вала с пологими склонами, расчлененными на крупные и мелкие глыбы, среди которых высятся отдельные подводные вулканические горы или вулканические массивы. Параллельно главной оси ВТП иногда встречаются глыбово-вулканические поднятия относительно небольшой протяженности. Гребень ВТП располагается на глубинах 2–3 км, и лишь несколько отдельных вулканов поднимаются до отметок менее 2 км. Высшей точкой хребта в этой части океана является остров Пасхи, расположенный в зоне его сочленения с широтным глыбово-вулканическим хребтом Сала-и-Гомес.

Особенностью ВТП, отличающей его от других срединных хребтов, является отсутствие продольной рифтовой долины и обрамляющей ее хребтов, что объясняется высоким темпом спрединга (до 16 см/год), при котором обильные массы поступающего к поверхности магматического материала полностью заполняют рифтовую долину [32].

Осадочный слой на поднятии довольно тонкий, а в ряде мест и вообще отсутствует. Второй слой, представленный в основном базальтами, имеет мощность порядка 1 км, а “базальтовый слой”, который, судя по результатам драгировок на разломе Хизена в 24-м рейсе НИС “Академик Курчатов”, состоит из амфиболитовых сланцев, имеет мощность 3.6–3.7 км, что почти на 2 км меньше мощности этого слоя за пределами ВТП. Г. Менард в своих работах называл ВТП мегантиклинальным воздыманием океанской земной коры, в котором слои становятся постепенно все более тонкими по мере приближения к гребню [32].

На всем протяжении ВТП расчленено многочисленными трансформными разломами, по которым его блоки сдвинуты иногда на значительные расстояния. Например, смещение оси ВТП в разломах Хизена и Тарп трансформной системы Элтанн между 53° и 57° ю.ш. достигает 15° по долготе, т.е. более 1500 км. Характер смещения меняется по простиранию ВТП: к югу от параллели 40° ю.ш. преобладают правосторонние смещения, между 40° и 20° ю.ш. – левосторонние, а севернее 20° ю.ш., вплоть до стыка с широтным Галапагосским поднятием, – опять правосторонние.

Многие исследователи также отмечают сходные черты в геофизических полях южной части

**Таблица 2.** Статистические характеристики геотраверса в южном полушарии Тихого океана

№ геотраверса	№ 3 15° ю.ш.	
	запад	восток
Среднее значение теплового потока	88	72
Среднеквадратическое отклонение	61	59
Количество измерений	3745	3520
Значение критерия Крамера–Вэлча	2.84	
Доверительная вероятность	99%	

Срединно-Атлантического хребта и ВТП в юго-восточной части Тихого океана [30, 32]. Это сходство выражается в одинаковых величинах аномалий полного вектора геомагнитного поля и гравитационных аномалий в редукции Фая.

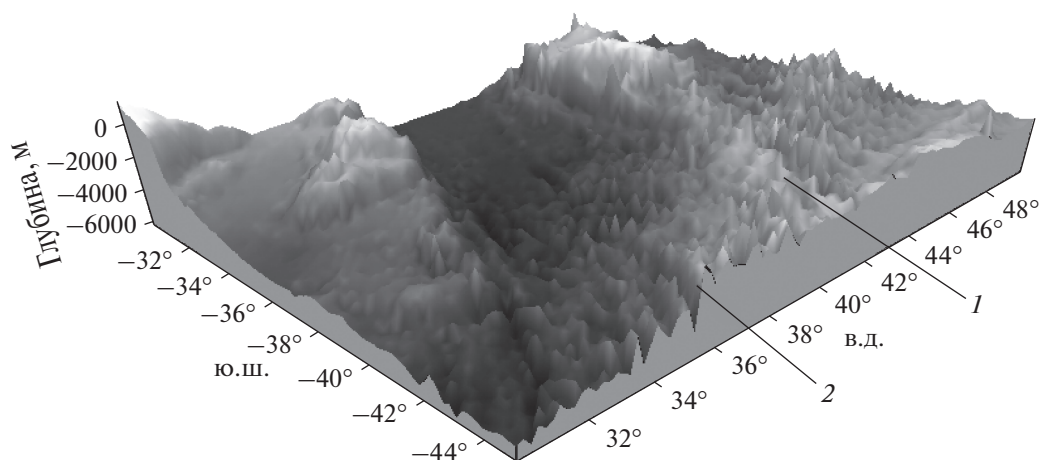
Основной объем геотермических измерений в этой части Тихого океана был получен американскими и канадскими учеными. Тем не менее, около 50 измерений теплового потока выполнено российскими учеными, в том числе и авторами данной работы, во время 14-го рейса НИС “Дмитрий Менделеев” и 24-го рейса НИС “Академик Курчатов” [12].

Район геотраверса 15° ю.ш. характеризуется самой высокой геотермической изученностью из всех рассмотренных объектов. В общей сложности здесь проанализировано 7260 измерений теплового потока, из которых 3740 расположены западнее оси ВТП, и 3520 – восточнее. Расчет статистического различия выборок показал, что на этом пересечении ВТП существует значимая асимметрия теплового потока: среднее его значение западнее хребта составляет 88 мВт/м<sup>2</sup>, а восточнее – 72 мВт/м<sup>2</sup> (табл. 2).

**Индийский океан.** В настоящей работе мы проанализировали распределение теплового потока на флангах Юго-Западного Индийского хребта (ЮЗИХ) (см. рис. 1). Он морфологически разделяется на Западно-Индийский (ЗИХ) и Африкано-Антарктический хребты, сочленение которых происходит в зоне трансформного разлома Принца Эдуарда на 37° в.д. (рис. 3). Хребты характеризуются интенсивно расчлененным рельефом с перепадом высот до 4 км. Они пересекаются многочисленными трансформными разломами, смещающими современную ось спрединга иногда на десятки миль [19].

ЮЗИХ относится к медленно спрединговым хребтам [34]. Скорость спрединга здесь, в среднем, не превышает 14 км/млн лет (1.4 см/год)<sup>2</sup>, причем аккреция коры по разные стороны от оси хребта резко асимметрична. Так, на “Антарктической” стороне она составляет 8.5 км/млн лет, а на

<sup>2</sup> Для сравнения, на Срединно-Атлантическом хребте средняя скорость спрединга составляет 2.5 см/год.



**Рис. 3.** Морфологическая схема Юго-Западного Индийского хребта.  
1 – Западно-Индийский хребет; 2 – трансформный разлом Принца Эдуарда.

“Африканской” – 5.5 км/млн лет [27]. Вдоль простирается ЮЗИХ также наблюдается структурная асимметрия. Участки хребта, лежащие западнее трансформного разлома Эндрю-Бэйн (30° в.д.) и восточнее трансформного разлома Мэлвилл (61° в.д.), характеризуются аномально глубокой осевой долиной, косым спредингом, небольшой величиной центральной магнитной аномалии и нестабильным морфологическим проявлением на дне пассивных частей трансформных разломов [23, 27]. Такие свойства периферийных частей ЮЗИХ позволяют предположить, что они имеют относительно “холодную” мантию, прочную и толстую литосферу и ограниченные запасы магмы. Напротив, центральная часть ЮЗИХ, между 30° и 61° в.д., характеризуется прекрасно проявляющимися в рельефе трансформными разломами, ортогональным спредингом и ярко выраженной центральной магнитной аномалией [34]. Внутри этой части ЮЗИХ, между трансформными разломами Атлантис II (56°45′ в.д.) и Навара (58°40′ в.д.), лежит сегмент, который, судя по скорости спрединга, можно сравнить с большинством сегментов Срединно-Атлантического хребта.

Таким образом, ЮЗИХ характеризуется структурной и морфологической асимметрией вдоль и вкросст своего простираения.

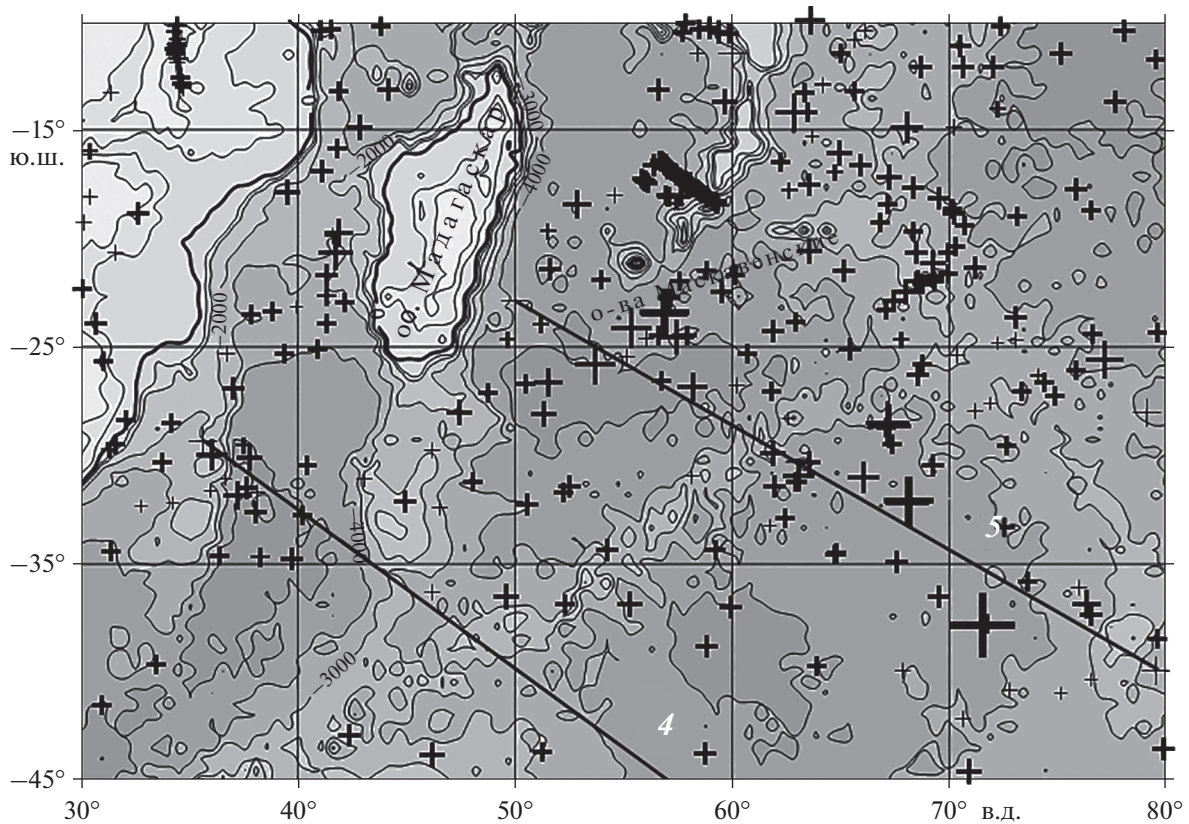
В юго-западной части океана, начиная с конца 60-х годов XX века, неоднократно проводились экспедиционные работы на американских, французских и японских научно-исследовательских судах, включавшие измерения теплового потока [20, 21, 24, 28]. Компиляция измеренных значений теплового потока отражена в глобальных базах данных [26, 29, 35]. На рис. 4 показаны все известные на сегодняшний день пункты измерений в этой части Индийского океана.

Для установления факта геотермической асимметрии на флангах ЗИХ нами было проведено сравнение выборок данных теплового потока вдоль двух длинных профилей (геотравверсов), пересекающих хребет (см. рис. 4). Статистические выборки для каждого из этих геотравверсов вполне представительны (табл. 3) для проведения сравнительного анализа.

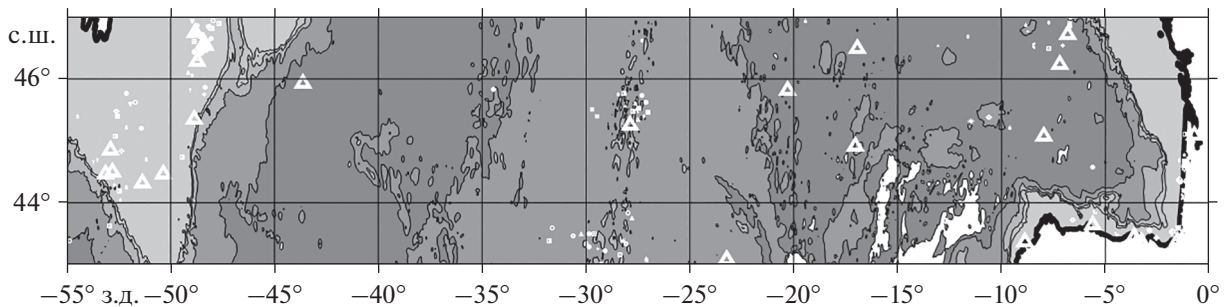
Таким образом, в юго-западной части Индийского океана мы констатируем наличие не только структурной, но и геотермической асимметрии ЗИХ относительно его оси. Западный склон и смежная абиссальная котловина характеризуется более высоким тепловым потоком по сравнению с восточной частью ЗИХ в полосе обоих геотравверсов.

**Таблица 3.** Статистические характеристики для значений теплового потока (мВт/м<sup>2</sup>) по геотравверсам № 5 и № 4 (Индийский океан)

№ геотравверса	№ 5		№ 4	
	З	В	З	В
западнее/восточнее оси ЗИХ	3	В	3	В
Среднее значение теплового потока	76	48	124	77
Среднеквадратическое отклонение	59	30	79	40
Количество измерений	65	28	12	48
Значение критерия Крамера–Вэлча ( $T$ )	2.38		2.9	
Доверительная вероятность	99%		99%	



**Рис. 4.** Батиметрическая карта юго-западной части Индийского океана (сечение изобат – 1000 м) и расположение точек измерения теплового потока (крестики). Размер крестиков пропорционален величине теплового потока. 4, 5 – номера геотраверсов (см. рис. 1), вдоль которых проведена статистическая обработка геотермических данных.



**Рис. 5.** Рельеф дна и пункты измерений теплового потока (треугольники) в районе геотраверса 45° с.ш. Размер треугольников пропорционален величине теплового потока.

Подводя итоги статистического анализа асимметрии СОХ южного полушария, мы отмечаем, что для всех пересечений хребтов в трех океанах Земли западный фланг обладает более высоким тепловым потоком, чем восточный.

### СЕВЕРНОЕ ПОЛУШАРИЕ ЗЕМЛИ

В северном полушарии рассматривались четыре геотраверса: 6) геотраверс 45° с.ш., 7) Канаро-

Багамский геотраверс (28° с.ш.), 8) геотраверс 19° с.ш. – в Атлантике и 9) геотраверс 10° с.ш. в Тихом океане.

**Атлантический океан.** Геотраверс 45° с.ш. простирается от Бискайского залива на востоке до Ньюфаундлендской котловины – на западе, пересекая САХ на 28° з.д. Район достаточно хорошо изучен всеми геолого-геофизическими методами. Достаточно сказать, что только измерений теплового потока здесь выполнено более 250 (рис. 5).

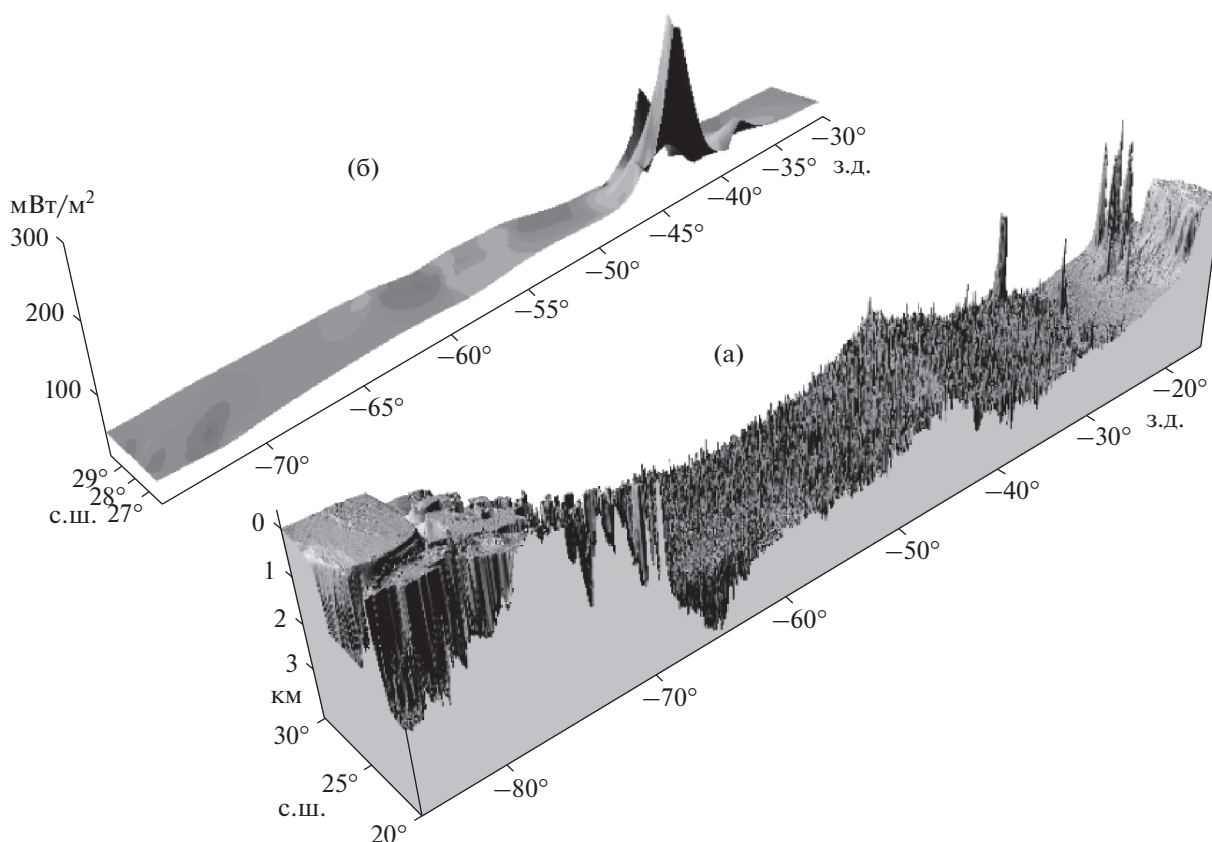


Рис. 6. Блок-диаграммы рельефа дна (а) и теплового потока (б) вдоль геотраверса № 7 (Канаро-Багамский).

Диапазон изменения теплового потока очень широкий. Минимальное значение составляет  $25 \text{ мВт/м}^2$ , а максимальное —  $180 \text{ мВт/м}^2$ . Заметим, что САХ в этом районе характеризуется не самыми экстремальными значениями, что обычно связывают с уменьшением кондуктивного теплового потока из-за теплопереноса в рифтовой долине хребта.

Максимальные значения теплового потока относятся к восточному склону САХ в районе 8–10-й магнитных аномалий. Далее на восток, в Бискайском заливе тепловой поток несколько

уменьшается, но, тем не менее, остается повышенным по сравнению с Ньюфаундленской котловиной. Сравнение выборок теплового потока западнее и восточнее оси САХ показало, что выборка на востоке имеет статистически значимое превышение среднего теплового потока над тем, которое характеризует выборку на западе (табл. 4).

Позиция Канаро-Багамского геотраверса ( $23^\circ$ – $29^\circ$  с.ш.) выбрана так, что им пересекается только одна дивергентная граница плит (САХ) (рис. 6), которая функционировала на протяжении всей истории раскрытия Атлантики. Расположенная между наиболее удаленными друг от друга атлантическими трансформными разломами Кейн и Атлантик, полоса геотраверса покрывает регион, наиболее представительный для рассмотрения процессов аккреции и эволюции океанической коры в обстановке медленного спрединга [6].

По результатам сейсмических работ, в районе геотраверса выделяется два типа земной коры, имеющих определенную структуру волнового поля и скоростные характеристики — нормальная и аномальная кора. Нормальная кора характеризуется наличием трех сейсмокомплексов: 1-й сейсмокомплекс, который по особенностям волнового поля сопоставляется с пиллоу-лавами и

Таблица 4. Статистические характеристики для значений теплового потока ( $\text{мВт/м}^2$ ) по геотраверсу № 6

№ геотраверса	№ 6 ( $45^\circ$ с.ш.)	
	запад	восток
запад/восток		
Среднее значение теплового потока	69	84
Среднеквадратическое отклонение	57	43
Количество измерений	95	200
Значение критерия Крамера–Вэлча	2.6	
Доверительная вероятность	99%	



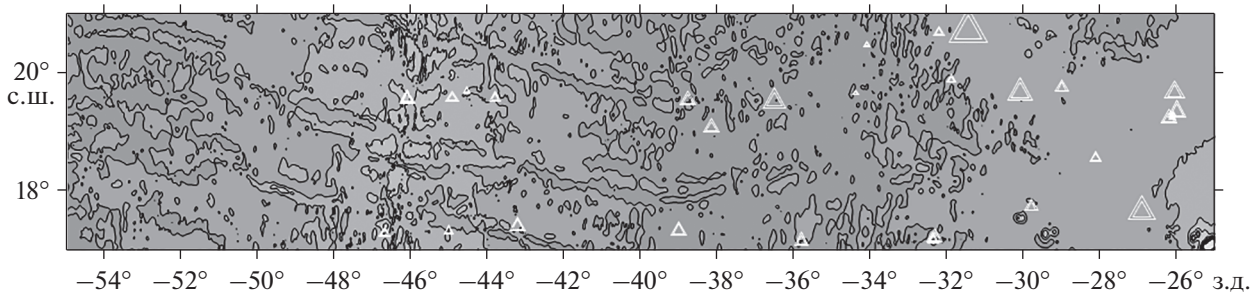


Рис. 7. Рельеф и положение точек измерения теплового потока (треугольники) вдоль геотраверса 19° с.ш. (размер треугольников пропорционален величине теплового потока).

базальтовыми потоками в разрезах офиолитов; 2-й – (акустически прозрачный горизонт) интерпретируется как комплекс параллельных даек; 3-й сейсмокомплекс по присутствию динамически выраженных отражающих площадок и наклонных рефлекторов отвечает габброидам нижних частей разреза типичных офиолитов. На большинстве временных разрезов МОВ выделяется раздел Мохо, отмечающий переход от “слоистой” к “неслоистой” записи. На профилях МОВ в полосе Канаро-Багамского геотраверса встречаются также участки, где волновые поля имеют аномальные особенности: насыщение осями дифракции или отражающие границы сложной структуры (наклонные и “шпорообразные” рефлекторы).

Проявления асимметрии на геотраверсе отмечались при анализе “корневой зависимости” рельефа на склонах САХ [6], гравитационных аномалий Фая [5] и теплового потока [11]. Однако, статистическое сравнение геотермических характеристик однотипных морфологических элементов вдоль Канаро-Багамского геотраверса выявило их неоднородность. Так, сравнение статистик теплового потока в абиссальных котловинах показало, что в Канарской котловине в полосе геотраверса тепловой поток статистически значимо выше, чем в южной части Северо-Американской (Багамской) котловины. В то же время, сравнение распределения теплового потока на склонах САХ не обнаружило значимого различия с восточной и западной стороны от оси хребта.

Появление новой, намного более представительной базы данных по тепловому потоку [26] позволило заметно увеличить анализируемую выборку по Канаро-Багамскому геотраверсу. Если раньше в полосе геотраверса мы анализировали 42 измерения, то в последней базе те же координаты включали 70 измерений.

В табл. 5 приведены результаты статистической обработки выборок теплового потока в западной и восточной периферии геотраверса. Расчеты показали, что, в суммарной выборке превышение среднего теплового потока восточнее САХ

статистически значимо по сравнению с выборкой геотермических данных западнее хребта.

На рис. 7 показан рельеф дна в районе геотраверса 19° с.ш. (№ 8). Этот блок земной коры почти не затронут трансформными смещениями и может рассматриваться как тектонотип симметричного расположения морфологических элементов океанического дна: склонов САХ и смежных абиссальных котловин.

Тем не менее, сравнение выборок теплового потока, сформированных на основании измерений по разные стороны от оси САХ, показало статистически значимое различие – восточный фланг геотраверса обладает более высоким средним тепловым потоком (табл. 6).

**Тихий океан.** В Пацифике лишь один геотраверс в северном полушарии удовлетворяет условию достаточной геотермической изученности. Это геотраверс № 9, пересекающий ВТП на 10° с.ш. Вдоль этого геотраверса усилиями, в основном, американских исследователей, получено более 5000 измерений теплового потока [31, 33, 36]. Подавляющее число измерений лежит в пределах 65–100 мВт/м<sup>2</sup>. Лишь около 20 точек характеризуются ураганными значениями 250–260 мВт/м<sup>2</sup>, тяготеющими к оси ВТП. Статистический анализ показал хотя и небольшое, но значимое различие теплового потока флангов ВТП: восточный фланг имеет более высокое среднее значение, чем западный (табл. 7).

Таблица 5. Статистические характеристики для значений теплового потока (мВт/м<sup>2</sup>) по геотраверсу № 7

Геотраверс № 7 Канаро-Багамский		
запад/восток	запад	восток
Среднее значение теплового потока	78	105
Среднеквадратическое отклонение	56	79
Количество измерений	565	36
Значение критерия Крамера–Вэлча	1.99	
Доверительная вероятность	95%	

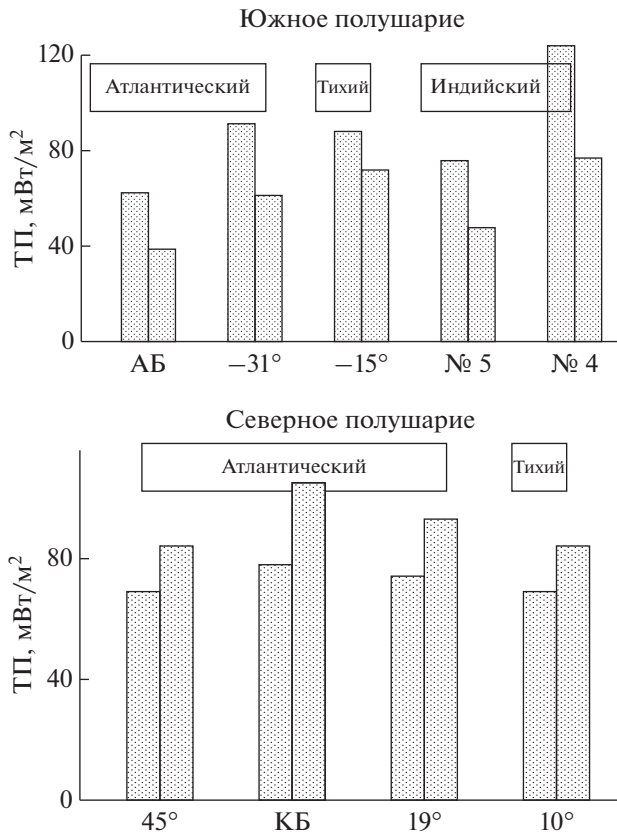


Рис. 8. Гистограммы распределения среднеарифметических значений теплового потока вдоль геотравверсов в Южном и Северном полушариях Земли.

Таблица 6. Статистические характеристики для значений теплового потока (мВт/м²) по геотравверсу 19° с.ш. (№ 8)

№ геотравверса	№ 8 19° с.ш.	
	запад	восток
Среднее значение теплового потока	74	93
Среднеквадратическое отклонение	51	54
Количество измерений	22	30
Значение критерия Крамера–Вэлча	2.04	
Доверительная вероятность	99%	

Таблица 7. Статистические характеристики для значений теплового потока (мВт/м²) по геотравверсу 10° с.ш. в Тихом океане (№ 9)

№ геотравверса	№ 9 10° с.ш.	
	запад	восток
Среднее значение теплового потока	69	84
Среднеквадратическое отклонение	53	56
Количество измерений	2829	3160
Значение критерия Крамера–Вэлча	2.09	
Доверительная вероятность	95%	

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление геотермических данных для флангов геотравверсов, пересекающих все СОХ в океанах Земли, выявило статистически значимую асимметрию теплового потока, различающуюся по направлению в южном и северном полушариях Земли: в южном полушарии западные фланги геотравверсов характеризуются более высоким тепловым потоком, а в северном – восточные (рис. 8).

Объяснение этого феномена требует не только корректировки основных положений парадигмы спрединга океанского дна, но и более глобальных, планетарных причин проявления асимметрии в быстро- и медленно спрединговых хребтах. Можно указать, как минимум, две возможные причины, осложняющие симметричный дивергентный механизм. Это различающийся возраст блоков тектонических плит по разные стороны от оси хребта и/или наложение вторичных процессов на первичный спрединг, которые идут с выделением или поглощением энергии. Среди таких процессов можно указать на растяжение коры в аккреционной зоне и в смежных абиссальных котловинах, которое сопровождается образованием листрических сбросов, а также образование шарьированных блоков, экранирующих глубинный тепловой поток. С этими тектоническими процессами неразрывно связано сложное перераспределение конвективных потоков в верхней части океанской литосферы, которое фиксируется в геотермическом поле наличием аномально высоких и аномально низких (и даже нулевых) значений теплового потока.

Существующая методика расчета возраста второго слоя океанской коры по геотермическим данным (см. напр., [4, 14]) основана на предположении о равной скорости спрединга по обе стороны от оси океанических хребтов. Именно на этом основании выведена формула, позволяющая рассчитать возраст дна ( $t$ ) по измерениям теплового потока ( $q$ ):  $q = \lambda T_a / \sqrt{\pi a t}$ , где  $\lambda$  – теплопроводность литосферы;  $T_a$  – температура астеносферы;  $a$  – температуропроводность, а также производную от этой другую формулу для оценки мощности литосферы ( $H_L$ ):  $H_L = (T_s / T_a) \sqrt{\pi a t}$ , где  $T_s$  – температура солидуса мантийного вещества. Наличие геотермической асимметрии существенно осложняет применение этих формул и заставляет предположить другую, более сложную модель для количественных оценок параметров океанской литосферы. Проведенные ранее исследования поиска корреляционной зависимости возраста океанической коры по магнитным аномалиям и по величине теплового потока не установили значимую корреляцию [22]. Идея о суще-

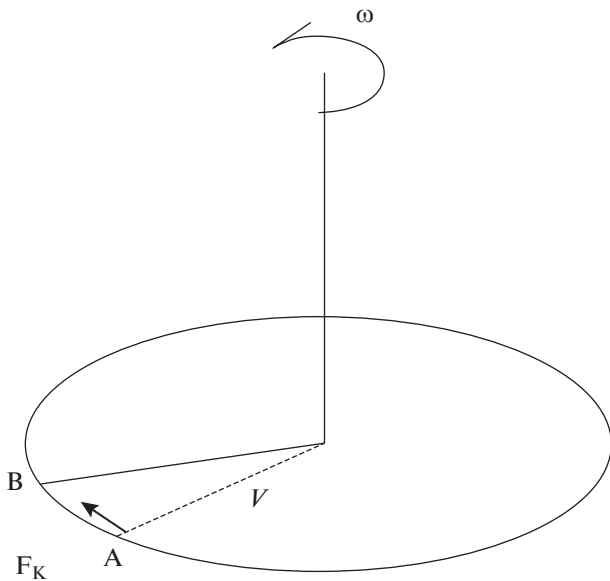


Рис. 9. Действие силы Кориолиса (пояснения в тексте).

Выше мы упомянули влияние силы Кориолиса, неизменно проявляющееся на вращающейся Земле.

На любую материальную точку Земли ( $m$ ) из-за ее вращения против часовой стрелки с угловой скоростью ( $\omega$ ) будет действовать сила Кориолиса  $F_K = 2mv\omega \sin\phi$ , которая в южном полушарии будет смещать массу влево относительно радиуса (рис. 9), а в северном, соответственно, вправо. В дивергентных зонах такой массой является магма, скопившаяся в астеносферном мантийном резервуаре и перемещающаяся внутри него под действием силы Кориолиса (рис. 10). Избыточная энтальпия этой массы обуславливает то специфическое распределение конвективного и кондуктивного теплового потока, которое мы наблюдаем в дивергентных зонах. Конвективная разгрузка глубинного тепломассопотока направлена строго вдоль разломной рифтовой зоны и выражается, в конечном итоге, в виде вулканических проявлений на морском дне. В то же время, главным источником кондуктивного теплового потока на флангах СОХ и в смежных абиссальных котловинах является присутствие фракционно расплавленного мантийного материала в астеносферном резервуаре. Концентрация магмы в этом резервуаре асимметрична, что обуславливается влиянием силы Кориолиса (см. рис. 10). Появление большего количества высоко энтальпийной массы на одном из флангов объясняет наблюдаемую асимметрию кондуктивного теплового потока.

ствовании геотермической асимметрии позволяет объяснить причину отсутствия корреляции.

Перечисленные факторы, несомненно, требуются учитывать при анализе геотермического поля океанской коры, но они не объясняют разное “направление асимметрии” в северном и южном полушариях.

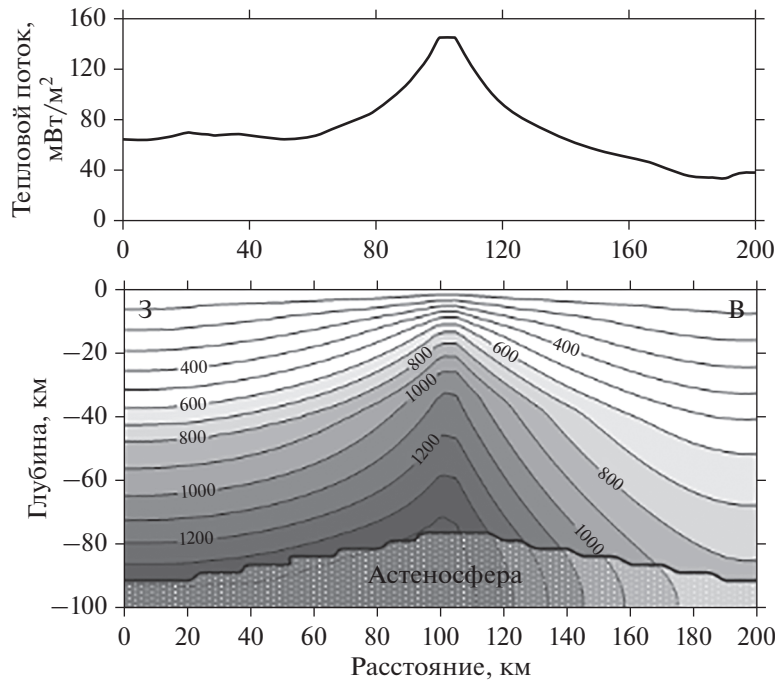
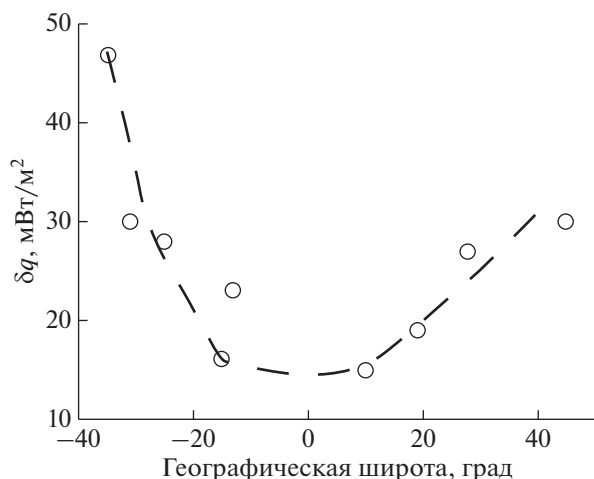


Рис. 10. Асимметрия геотемпературного поля,  $T$ , °C (внизу) и теплового потока (вверху) вкост простираения срединно-океанического хребта (пример для Южного полушария Земли).



**Рис. 11.** Зависимость показателя геотермической асимметрии  $\delta q$  от географической широты расположения геотраверса.

Геотраверсы № 1–5 расположены в южном полушарии, поэтому магма в астеносферном резервуаре концентрируется на западном его фланге, что объясняет наблюдаемую “западную” асимметрию во всех океанах планеты.

Для геотраверсов № 6–9, расположенных в северном полушарии, более “прогретым” оказывается восточный фланг геотраверса, что также однозначно можно связать с влиянием силы Кориолиса, перераспределяющей магматические массы в астеносферном резервуаре.

Мы предлагаем ввести “количественный показатель геотермической асимметрии”, который характеризуется абсолютной величиной разницы средних значений теплового потока на разных флангах геотраверса:  $\delta q = |q_1 - q_2|$ . Из-за увеличения силы Кориолиса по направлениям к полюсам Земли, этот показатель должен быть больше для геотраверсов в высоких широтах, чем в приэкваториальных. На рис. 11 по оси ординат отложена величина  $\delta q$  для всех изученных геотраверсов как функция широты его расположения. Фиттинговая аппроксимация (пунктирная кривая) имеет форму параболы с минимумом на широте экватора.

Таким образом, мы подтвердили с помощью статистического анализа, что главным фактором, обуславливающим асимметрию теплового потока в дивергентных зонах Мирового океана, является действие силы Кориолиса на высокоэнthalпийные магматические массы в астеносферном очаге.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы № 0135-2015-0021, гранта РФФИ № 19-05-00014 и Программы Президиума РАН № 49.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайнанов А.Г. Гравиметрические исследования земной коры океанов. М.: МГУ, 1980. 240 с.
2. Глебовский В.Ю., Каминский В.Д., Осипов В.А. Структура аномального магнитного поля от срединного хребта до Ангольского шельфа. Литосфера Ангольской котловины и восточного склона Южно-Атлантического хребта. Л.: ВНИИОкеангеология, 1986. С. 70–80.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2005. С. 327–349.
4. Городницкий А.М. Строение океанической литосферы и формирование подводных гор. М.: Наука, 1985. 166 с.
5. Маценков С.П., Погребицкий Ю.Е. Симметрия и асимметрия САХ по материалам комплексных геофизических исследований на атлантических геотраверсах // Геология и минеральные ресурсы Мирового океана. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1995. С. 64–79.
6. Маценков С.П., Погребицкий Ю.Е., Астафурова Е.Г. и др. Глубинное строение и эволюция литосферы Центральной Атлантики (результаты исследований на Канаро-Багамском геотраверсе). СПб.: ВНИИОкеангеология, 1998. 290 с.
7. Нарышкин Г.Д., Погребицкий Ю.Е. Морфоструктура дна Юго-Восточной Атлантики. Литосфера Ангольской котловины и восточного склона Южно-Атлантического хребта. Л.: ВНИИОкеангеология, 1986. С. 10–23.
8. Погребицкий Ю.Е., Горячев Ю.В., Осипов В.А., Трухалев А.И. Строение океанической литосферы по результатам исследований на Анголо-Бразильском геотраверсе // Сов. геология. 1990. № 3. С. 8–22.
9. Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Планетарный тепловой поток (Карта масштаба 1 : 30 000 000 и объяснительная записка к ней) // Москва-Санкт Петербург: Оргсервис ЛТД, 1997. 65 с.
10. Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Асимметрия распределения теплового потока вдоль Анголо-Бразильского геотраверса (Южная Атлантика) // Докл. РАН. 1998. Т. 355. № 4. С. 212–215.
11. Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Геотермическая асимметрия срединных хребтов Мирового океана // Геотектоника. 1999. № 3. С. 21–42.
12. Попова А.К., Смирнов Я.Б., Хуторской М.Д. Геотермическое поле трансформных разломов. // Глубинные разломы океанского дна. М.: Наука, 1984. С. 78–87.
13. Пушаровский Ю.М., Пейве А.А., Разницин Ю.Н., Базилевская Е.С. Разломные зоны Центральной Атлантики. М.: ГЕОС, 1995. 163 с. (Тр.ГИН РАН. Вып. 495).
14. Сорохтин О.Г. Глобальная эволюция Земли. М.: Наука, 1974. 184 с.
15. Хуторской М.Д., Тевелева Е.А. Тепловой поток в абиссальных котловинах Пацифики и Атлантики // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. № 4(29). С. 20–27.

16. Хуторской М.Д., Поляк Б.Г. Тепловой поток в трансформных разломах Северной Атлантики и Юго-Восточной Пацифики // Геотектоника. 2017. № 2. С. 55–66.
17. Хуторской М.Д., Тевелева Е.А., Подгорных Л.В. Геотермическая асимметрия трансформных разломов экваториальной части Атлантического океана // Докл. РАН. 2017. Т. 475. № 3. С. 325–328.
18. Хуторской М.Д., Тевелева Е.А. О геотермической асимметрии юго-западного Индийского хребта // Мониторинг. Наука и технологии. 2018. № 1. С. 6–16.
19. Шрейдер А.А. Геомагнитные исследования Индийского океана. М.: Наука, 2001. 320 с.
20. Anderson R.N., Langseth M.G., Sclater J.G. The mechanisms of heat transfer through the floor on the Indian Ocean // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 3391–3409.
21. Anderson R. N., Langseth M. G., Hobart M. A. Geothermal convection through oceanic crust and sediments in the Indian Ocean // Science. 1979. V. 204. P. 828–832.
22. Budanov V.G., Ermakov B.V., Podgornykh L.V. Geophysical asymmetry of the wings of mid-Atlantic ridge (MAR): gravity, magnetic fields, heat flow // European Geophysical Society, Annales Geophysical, part I, Society Symposia, Solid Earth Geophysics & Natural Hazards, Supplement I to Volume 15, SE27 Tectonic evolution and thermal structure at mid-ocean ridges. 1997. P. 161.
23. Cannat M., Rommevaux-Jestin C., Sauter D. et al. Formation of the axial relief at the very slow spreading Southwest Indian Ridge (49° to 69° E) // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 22825–22843.
24. Courtney R.C., Recq M. Anomalous heat flow near the Crozet Plateau and mantle convection // Earth Planet. Sci. Lett. 1986. V. 79. P. 373–384.
25. Hasterok D. Thermal Regime of the Continental and Oceanic Lithosphere. Ph.D. Dissertation, University of Utah. 2010. 156 p.
26. Hasterok D. et al. <http://heatflow.org/data>
27. Hosford A. Crustal accretion and Evolution at slow and ultra-slow spreading mid-ocean ridges. Doct. Dissertation. Mass. Inst. Technology, Cambridge, Mass., 02139 & Woods hole ocean. Inst., Woods hole, Mass., 02543. 2001. 254 p.
28. Hyndman R.D., Langseth M.G., Von Herzen R.P. Deep - Sea Drilling project geothermal measurements: a review // Rev. Geophys. 1987. V. 2.5. P. 1563–1582.
29. Jessop A.M., Hobart M.A., Sclater J.G. The world heat flow collection—1975 // Geothermal Series 5, Energy, Mines and Resources, Earth Physics Branch, Ottawa, Canada, 1976. 124 p.
30. Kuo B.-Y., Forsyth D.W. Gravity anomalies of the ridge transform system in the South Atlantic between 31 and 34.5° S. Upwelling centers and variation in crustal thickness // Mar. Geophys. Res. 1988. V. 10. P. 205–232.
31. McKenzie D.P., Sclater J.G. Heat flow in the eastern Pacific and sea-floor spreading // Bulletin of Volcanology. 1969. V. 33. P. 101–118.
32. Menard H.W. Fracture zones and offsets of the East-Pacific rise // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. № 2. P. 682–685.
33. Parsons B., Sclater J.G. An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. № 5. P. 883–890.
34. Patriat P., Sauter D., Munsch M., Parson L. A survey of the Southwest Indian Ridge axis between Atlantis II Fracture zone and the Indian Ocean Triple Junction : Regional setting and large-scale segmentation // Mar. Geophys. Res. 1997. V. 19. P. 457–480.
35. Pollack H.N., Hurter S.J., Johnston J.R. Global heat flow data set // World Data Center A for Solid Earth Geophysics, NOAA E/GCI, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, USA, 1992.
36. Von Herzen R.P., Uyeda S., Heat flow through the eastern Pacific ocean floor // J. Geophys. Res. 1963. V. 113. № 68. P. 4219–4250.

## Nature of Heat Flow Asymmetry on the Mid-Oceanic Ridges of the World Ocean

M. D. Khutorskoi<sup>a, #</sup>, E. A. Teveleva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>RAS Geological Institute, Moscow, Russia

<sup>#</sup>e-mail: mkhutorskoy@ginras.ru

A statistical analysis of heat flow distribution along nine geotraverses crossing the mid-oceanic ridges in the Atlantic, Pacific and Indian oceans is carried out. A significant asymmetry of heat flow distribution is established—its mean values differ on opposite sides of the ridges axis. In geotraverses of the southern Earth's hemisphere, their western flank has a higher heat flow mean, and in the geotraverses of the northern hemisphere there is the eastern flank. Various tectonic factors that lead to such a distribution are taken into account, but the universal cause of this regularity is suggested to be the effect of the Coriolis force, which, when the planet rotates, redistributes the magmatic material amount in the asthenospheric reservoir.

**Keywords:** heat flow, geotraverses, World ocean, Earth's hemispheres, asymmetry, Coriolis force