

УДК 550.361

АСИММЕТРИЧНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТАХ МИРОВОГО ОКЕАНА

М. Д. Хуторской*, Е. А. Тевелева

Представлено академиком РАН М.А. Федонкиным 29.01.2019 г.

Поступило 08.02.2019 г.

Проведён 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 перераспределяет количество магматического материала в астеносферном резервуаре.

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

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524892183-189>

Детальные исследования теплового потока в пределах склонов срединно-океанических хребтов (СОХ) 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 СОХ, смежных абиссальных котловин и пассивных частей трансформных разломов в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах был обоснован и подтверждён на основании статистической обработки выборок измерений из глобальной базы данных по тепловому потоку вдоль геотраверсов, пересекающих СОХ и охватывающих перечисленные структурные элементы океанической коры. [1]. Важно отметить, что асимметрия СОХ наблюдается не только в тепловом поле, но и в других геофизических полях: магнитном и гравитационном [2], а также в структуре коры [3].

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 тепло-

вого потока. Компиляция измеренных значений теплового потока отражена в глобальных базах данных [4–7].

Для установления факта геотермической асимметрии на флангах СОХ нами было проведено сравнение выборок данных теплового потока для однотипных элементов вдоль длинных профилей (геотраверсов), пересекающих хребты в Мировом океане: Срединно-Атлантический хребет (САХ), Восточно-Тихоокеанское поднятие (ВТП) и Западно-Индийский хребет (ЗИХ), рис. 1.

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

Для оценки статистически значимого различия средних значений теплового потока в исследуемых выборках использовался параметрический критерий Крамера–Вэлча.

ЮЖНОЕ ПОЛУШАРИЕ ЗЕМЛИ

В южном полушарии мы проанализировали распределение теплового потока вдоль пяти геотраверсов: 1) Анголо-Бразильский геотраверс (12° ю.ш.), 2) геотраверс вдоль 31° ю.ш. — в Атлантическом океане; 3) геотраверс 15° ю.ш. — в Тихом океане, а также геотраверсы в Индийском океане: 4) южная

Геологический институт

Российской Академии наук, Москва

*E-mail: mkhutorskoy@ginras.ru

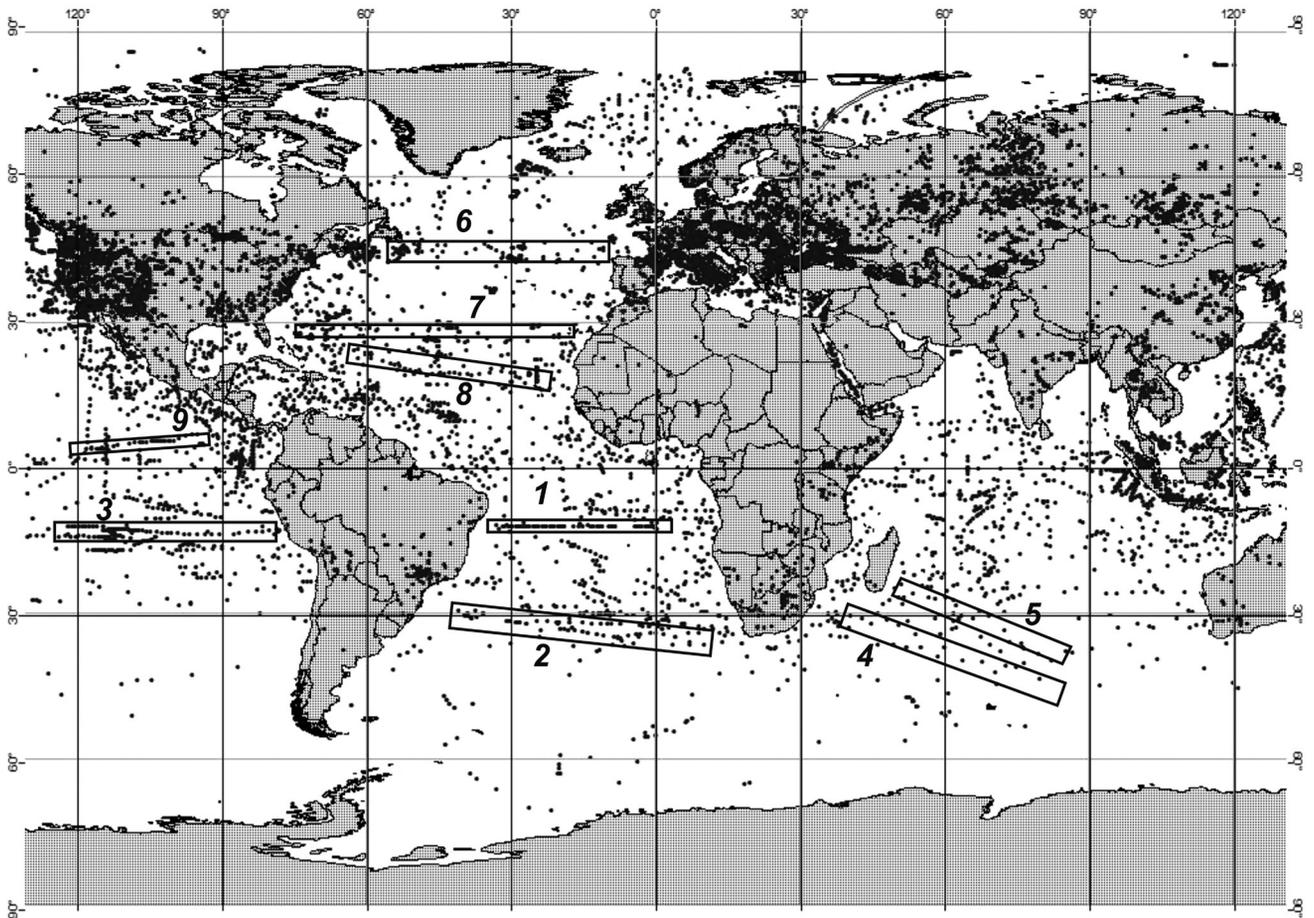


Рис. 1. Схема расположения точек измерения теплового потока и исследованных геотраверсов в Мировом океане (номера см. в тексте).

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 [8].

На основании анализа геотермических данных и расчёта критерия Крамера–Вэлча установлено значимое различие теплового потока по разные стороны САХ. Так, средний тепловой поток западнее САХ составляет 62 мВт/м^2 , а восточнее — 39 мВт/м^2 (табл. 1).

Геотраверс вдоль 31° ю.ш. протягивается от Капской котловины на востоке до Плато Риу-Гранди на западе Атлантического океана. В полосе геотраверса¹ имеется 6 измерений западнее САХ и 27 из-

мерений восточнее. Применяв ту же методику сравнения данных, мы рассчитали, что средний тепловой поток западнее САХ составляет 91 мВт/м^2 , а восточнее — 61 мВт/м^2 , т.е. пришли к аналогичному результату: западный фланг САХ на геотраверсах южного полушария в Атлантике обладает более высоким тепловым потоком (табл. 1).

Таблица 1. Статистические характеристики геотраверсов в южном полушарии Атлантики

Номер геотраверса	№ 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		80	

¹ В выборку данных теплового потока включались все измерения, расположенные в полосе шириной $\pm 2^\circ$ от оси геотраверса.

Тихий океан

В южном полушарии Тихого океана мы рассмотрели один геотраверс, пересекающий Восточно-Тихоокеанское поднятие (ВТП) по 15° ю.ш. Особенностью ВТП, отличающей его от других срединных хребтов, является отсутствие продольной рифтовой долины и обрамляющей её хребтов, что объясняется высоким темпом спрединга (до 16 см/год), при котором массы поступающего к поверхности магматического материала полностью заполняют рифтовую долину [9].

Основной объём геотермических измерений в этой части Тихого океана был получен американскими и канадскими учёными. Тем не менее около 50 измерений теплового потока выполнено российскими учёными, в том числе и авторами данной работы, во время 14-го рейса нис “Дмитрий Менделеев” и 24-го рейса нис “Академик Курчатов” [10].

Район геотраверса –15° ю.ш. характеризуется самой высокой геотермической изученностью из всех рассмотренных объектов (табл. 2).

Таблица 2. Статистические характеристики геотраверса в южном полушарии Тихого океана

Номер геотраверса	№ 3 –15° ю.ш.	
	Запад	Восток
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	

Расчёт статистического различия выборок показал, что на этом пересечении ВТП существует значимая асимметрия теплового потока: среднее его значение западнее хребта составляет 88 мВт/м², а восточнее — 72 мВт/м² (табл. 2).

Индийский океан

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. Хребты характеризуются интенсивно расчленённым рельефом с перепадом высот до 4 км. Они пересекаются многочисленными трансформными разломами, смещающими современную ось спрединга иногда на десятки миль [11].

В юго-западной части океана начиная с конца 1960-х гг. неоднократно проводились экспедиционные работы, включавшие измерения теплового потока.

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

Таблица 3. Статистические характеристики для значений теплового потока (мВт/м²) по геотраверсам № 5 и 4

Номер геотраверса	№ 5		№ 4	
	Запад	Восток	Запад	Восток
Западнее/Восточнее оси ЗИХ				
Среднее значение теплового потока	76	48	124	77
Среднеквадратическое отклонение	59	30	79	40
Количество измерений	65	28	12	48
Значение критерия Крамера—Вэлча (Т)	2,38		2,9	
Доверительная вероятность, %	99		99	

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

Подводя итоги статистического анализа асимметрии СОХ южного полушария, мы отмечаем, что для всех пересечений хребтов в трёх 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 Срединно-Атлантический хребет (САХ) на 28° з.д. Район достаточно хорошо

изучен всеми геолого-геофизическими методами. Достаточно сказать, что только измерений теплового потока здесь выполнено более 250. Диапазон изменения теплового потока очень широкий. Минимальное значение составляет 25 мВт/м², а максимальное 180 мВт/м².

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 остаётся 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).

Таблица 4. Статистические характеристики для значений теплового потока (мВт/м²) по геотраверсу № 6

Номер геотраверса	№ 6 (45° с.ш.)	
	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	

Канаро-Багамский геотраверс (23–29° с.ш.) расположен между наиболее удалёнными друг от друга атлантическими трансформными разломами Кейн и Атлантис; полоса геотраверса покрывает регион, наиболее представительный для рассмотрения процессов аккреции и эволюции океанической коры в обстановке медленного спрединга [12].

Проявления асимметрии на геотраверсе отмечались при анализе “корневой зависимости” рельефа на склонах САХ, гравитационных аномалий Фая и теплового потока [12]. 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 табл. 5 приведены результаты статистической обработки выборок теплового потока в западной и восточной периферии геотраверса. Расчёты показали, что в суммарной выборке превышение среднего теплового потока восточнее САХ статистически значимо по сравнению с выборкой геотермических данных западнее хребта.

Таблица 5. Статистические характеристики для значений теплового потока (мВт/м²) 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	

В районе геотраверса 19° с.ш. (№ 8) земная кора почти не затронута 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).

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

Номер геотраверса	№ 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	

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 [13, 14]. Подавляющее число измерений лежит в пределах 65–100 мВт/м². Лишь около 20 точек характеризуются ураганными значениями 250–260 мВт/м², 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).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление геотермических данных для флангов геотраверсов, пересекающих все СОХ в океанах Земли, выявило статистически значимую асимме-

Таблица 7. Статистические характеристики для значений теплового потока ($\text{мВт}/\text{м}^2$) по геотраверсу 10° с.ш. в Тихом океане (№ 9)

Номер геотраверса	№ 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	

трию теплового потока, различающуюся по направлению в южном и северном полушариях Земли: в южном полушарии западные фланги геотраверсов характеризуются более высоким тепловым потоком, а в северном — восточные (рис. 2).

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. Воз-

можны как минимум две 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.

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

На любую материальную точку Земли (m) из-за её вращения против часовой стрелки относительно северного полюса с угловой скоростью (ω) будет действовать сила Кориолиса $F_k = 2m \cdot v \cdot \omega \cdot \sin \varphi$, которая в южном полушарии будет смещать массу влево относительно радиуса, 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. 3).

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. 3). Появление большего количества высокоэнтальпийной массы на одном из флангов объясняет наблюдаемую асимметрию кондуктивного теплового потока.

Геотраверсы № 1–5 расположены в южном полушарии, поэтому магма в астеносферном резервуаре концентрируется на западном его фланге, что

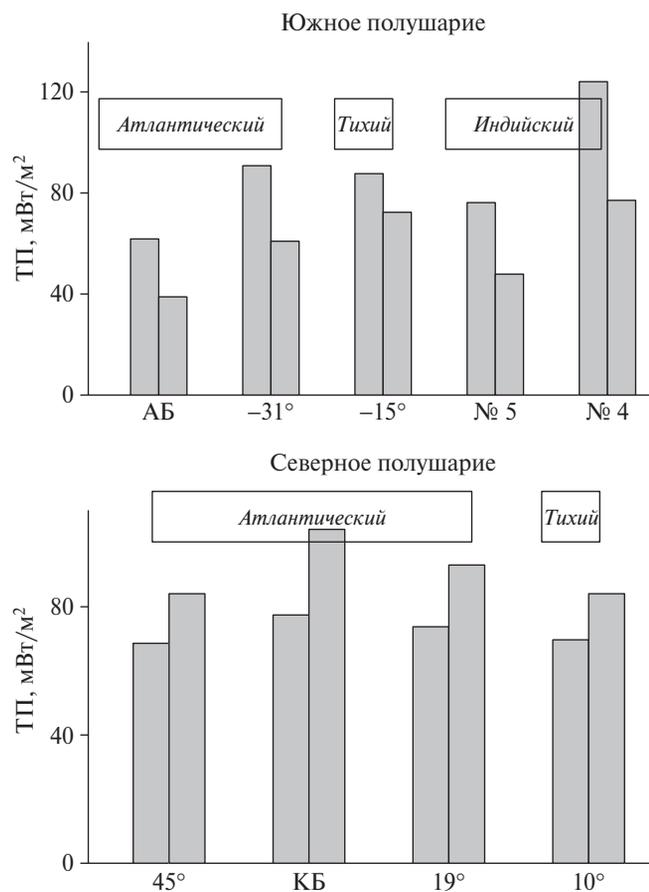


Рис. 2. Гистограммы распределения среднеарифметических значений теплового потока ($\text{мВт}/\text{м}^2$) вдоль геотраверсов (названия даны на оси абсцисс) в южном и северном полушариях Земли.

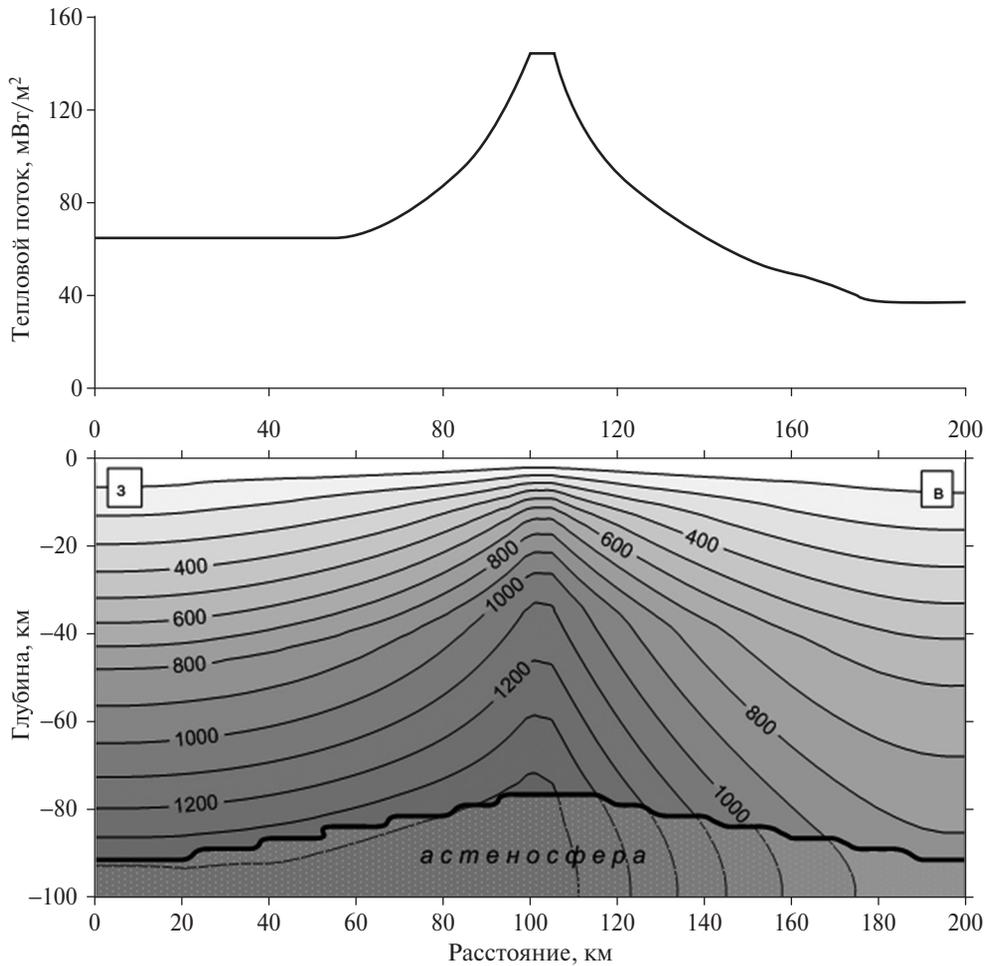


Рис. 3. Асимметрия геотемпературного поля, T , °C (внизу) и теплового потока (вверху) вкост простираия срединно-океанического хребта (пример для южного полушария Земли).

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. 4 по оси ординат отложена величина δq 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,

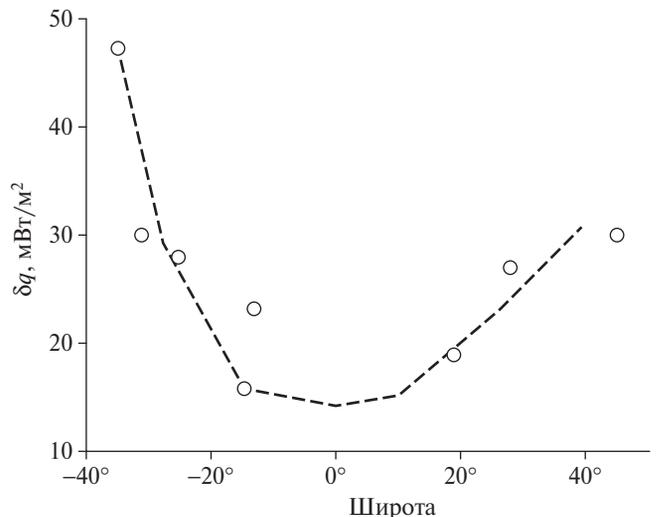


Рис. 4. Зависимость показателя геотермической асимметрии δq от географической широты расположения геотраверса.

обуславливающим асимметрию теплового потока в дивергентных зонах Мирового океана, является действие силы Кориолиса на высокоэнталпийные магматические массы в астеносферном очаге.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Геотермическая асимметрия срединных хребтов Мирового океана // Геотектоника. 1999. № 3. С. 21–42.
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., 1986. С. 70–80.
3. Пуцаровский 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).
4. 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.
5. 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.
6. Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Планетарный тепловой поток (Карта масштаба 1:30 000 000 и объяснительная записка к ней) // М.-СПб.: Оргсервис ЛТД, 1997. 65 с.
7. Hasterok, et al. <http://heatflow.org/data>
8. Мащенко С.П., Погребницкий 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.
9. Menard H.W. Fracture Zones and Offsets of the East-Pacific Rise // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. № 2. P. 682–685.
10. Попова А.К., Смирнов Я.Б., Хуторской М.Д. Геотермическое поле трансформных разломов // Глубинные разломы океанского дна. М.: Наука, 1984. С. 78–87.
11. 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.
12. Мащенко С.П., Погребницкий Ю.Е., Астафурова Е.Г. и др. Глубинное строение и эволюция литосферы Центральной Атлантики (результаты исследований на Канаро-Багамском геотраверсе). СПб.: ВНИИ-Океанология, 1998. 290 с.
13. McKenzie D.P., Sclater J.G. Heat Flow in the Eastern Pacific and Sea-Floor Spreading // Bull. Volcanology. 1969. V. 33. P. 101–118.
14. Von Herzen R.P., Uyeda S. Heat Flow through the Eastern Pacific Ocean Floor // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. P. 4219–4250.

ASYMMETRICAL HEAT FLOW DISTRIBUTION ON THE MID-OCEANIC RIDGES OF THE WORLD OCEAN

M. D. Khutorskoi, E. A. Teveleva

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS M.A. Fedonkin January 29, 2019

Received February 8, 2019

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.