УДК 550.361
© Хуторской М.Д., Тевелева Е.А.

ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В АБИССАЛЬНЫХ КОТЛОВИНАХ ПАЦИФИКИ И АТЛАНТИКИ

Хуторской М.Д., Тевелева Е.А.
Геологический институт РАН, Москва, Россия
e-mail: mkhutorskoy@ginras.ru

Проведен статистический анализ всех измерений теплового потока в крупнейших океанах Земли. Фоновые значения теплового потока оказались различными в разных абиссальных котловинах. Это дало основание для выводов о специфической тектонической истории этих структур и о влиянии вторичных термических процессов, проявлявшихся асимметрично относительно срединно-океанических хребтов.
Ключевые слова: тепловой поток, абиссальная котловина, Тихий океан, Атлантический океан, статистика.

HEAT FLOW IN PACIFIC AND ATLANTIC ABYSSAL BASINS

A statistical analysis of heat flow measured data in the Earth's major oceans was performed. Background heat flow has various values in different abyssal basins. This provided a basis for conclusions about the specific tectonic history of these structures and that the impact of the secondary thermal processes are asymmetrical towards the mid-ocean ridges.
Keywords: heat flow, abyssal basin, Pacific, Atlantic, statistical methods.

Измерения теплового потока через дно акваторий начались намного позже, чем на континентах. Первые измерения относятся к 1948 г. и приписываются Э.Булларду, хотя им приводятся только результаты измерений фрикционного тепла при внедрении грунтовой трубы в донные осадки. Первые же реальные измерения были выполнены в 1950 г. (Р.Ривелл и А.Максвелл). В 50-е и особенно в 60-е годы были значительно усовершенствованы геотермические зонды для измерений на акваториях, что позволило резко увеличить объем и качество исследований теплового потока. В ранних модификациях зондов предусматривалась возможность измерений только геотермического градиента на одной или нескольких базах, а теплопроводность осадков измерялась на борту судна после их извлечения из грунтовой трубы. В дальнейшем, уже в 70-80-е годы, были созданы и усовершенствованы зонды, измерявшие теплопроводность осадков в их естественном залегании (*in situ*).

Дно акваторий – это идеальная среда для геотермических измерений, так как подавляющая часть площади морей и океанов покрыта слоем ила, в котором тепло в первом приближении распространяется кондуктивно и в который можно легко внедрить геотермический зонд даже под собственным весом. В отличие от континентов, где измерения теплового потока «привязаны» к скважинам или к подземным выработкам, геотермические измерения на океанах могут быть выполнены практически везде, где есть донные осадки. А в последние десятилетия, в связи с океанским бурением на обнажениях второго океанического слоя, стало возможным измерять тепловой поток даже в местах, где отсутствуют осадки. Поэтому количество измерений на акваториях еще в 70-е годы превысило число континентальных измерений и очень быстро увеличивается. Если в 1975 г. количество измерений в глубоководных частях акваторий приближалось к 4000, то в 1990 г. их было уже более 10 тыс, а в 2010 году – почти 22 тысячи (рис. 1).

Спецификой океанических геотермических работ является то, что зонд заглубляется на ограниченную его длиной глубину (это, как правило, первые метры), поэтому измерения на море подвержены поверхностным искажениям в большей степени, чем на континентах, где они пренебрежимо малы в глубоких частях скважин. В связи с этим методически этот недостаток преодолевается за счет сгущения количества измерений на единицу площади. В этом случае среднее значение случайной величины – измеренного теплового потока – ассоциируется с глубинной его величиной, а дисперсия – с аномалиями поля на данном участке (хотя такой методический прием не исключает необходимости введения поправок в измеренные значения на влияние достоверно установленных искажающих факторов). Площади, на которых проводятся детальные геотермические измерения, называются полигонами. К полигонам можно отнести и профильные измерения с большой частотой измерительных станций. Целесообразность детальных профильных, а не площадных измерений возникает тогда, когда изучаются линейные структуры: разломы, троги, хребты и т.п. Наибольший интерес в настоящее время вызывают именно полигонные работы, где проводятся комплексные геолого-геофизические исследования, так как они позволяют не только корректно определить фоновый тепловой поток в данном месте Мирового океана, но и судить о причинах, создающих аномалии.

Абиссальные котловины Тихого океана

Глубоководные измерения, к которым относятся данные по океаническим котловинам, глубоководным желобам, зонам трансформных разломов, срединно-океаническим рифтовым зонам, глыбовым

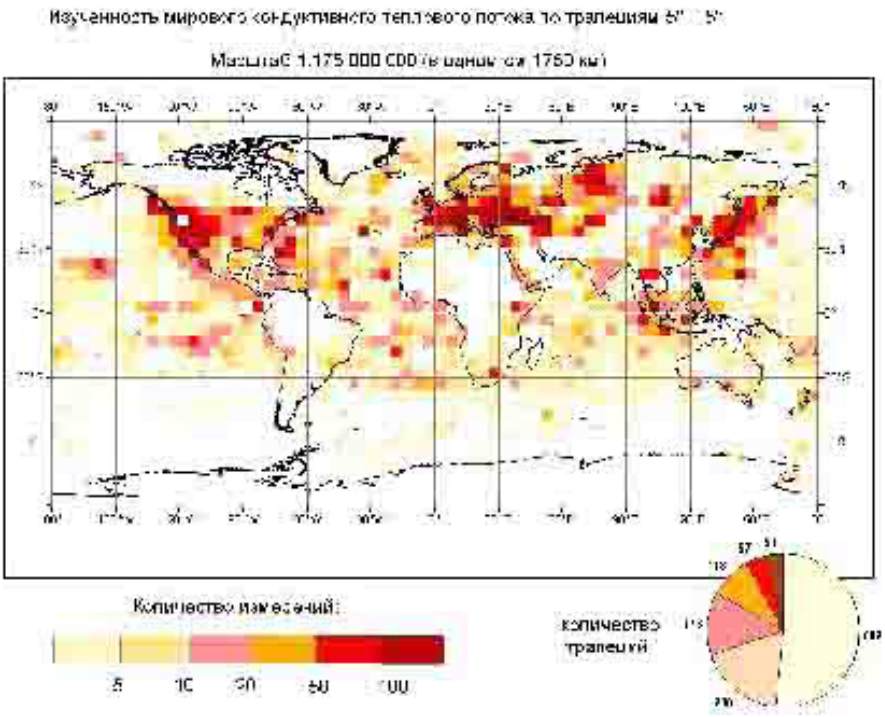

Рис. 1. Изученность планетарного теплового потока (данные по трапециям 5×5°)

поднятиям на океаническом дне, котловинам окраинных морей и другим структурам, приурочены к глубинам дна более 1500 м. Как правило, эти измерения позволяют оценить неискаженные значения геотермических градиентов и теплового потока. Этот класс измерений обычно характеризуется наименьшей погрешностью. Она составляет 5-10% и варьирует в зависимости от типа и длины зонда, количества измерительных баз, измерителя теплопроводности, условий внедрения зонда.

Абиссальные котловины, или, как их иногда называют, талассократоны, относятся к объектам первого порядка в структуре океанической литосферы. К этой же категории обычно относят срединно-океанические хребты, внутриплитные глыбовые и вулканические поднятия, трансформные разломы, а также переходные зоны от океана к континенту, включающие глубоководные желоба, островные дуги и задуговые бассейны.

Абиссальные котловины занимают примерно 85-88% площади Мирового океана [1], поэтому характеристика распределения теплового потока именно в этих структурно-формационных зонах является наиболее представительной для описания геотермических особенностей океанских просторов.

Начнем описание геотермического поля абиссальных котловин с Северо-Западной плиты Тихого океана. Эта плита на западе ограничена Курило-Камчатским и Японским глубоководными желобами, на севере – Командорской и Алеутской островными дугами, на востоке – западным побережьем Северо-Американского континента, на юге - условно грядой подводных гор Маркус-Неккер. В котловине идентифицированы позднемезозойские линейные магнитные аномалии с возрастом от 109 млн лет, причем в районе 45°с.ш. эта аномалия приближается к Курило-Камчатскому желобу, у острова Хоккайдо практически по оси желоба идентифицируются полосовые магнитные аномалии с возрастом около 120 млн лет [2].

Возрастные оценки подтверждаются данными глубоководного бурения (например, скв. 303-306, DSDP, Leg 32) и свидетельствуют об омоложении Северо-Западной плиты Тихого океана как по направлению к желобам, так и с юго-запада на северо-восток относительно оси желобов. Средний тепловой поток для интервала возраста дна от 80 до 110 Ма составляет 58±9 мВт/м^2, с увеличением возраста дна несколько уменьшается тепловой поток – 45±10 мВт/м^2 – для возраста 110-120 Ма. В целом, можно отметить, что тепловой поток достаточно однороден, и подавляющее число измерений приходится на интервал 35-56 мВт/м^2.

Некоторый разброс значений наблюдается на невулканических глыбовых поднятиях в пределах плиты – поднятиях Шатского и Хесса. Возвышенность Шатского поднимается над окружающими абиссальными равнинами на 1500-2000 м и может быть оконтурена изобатой 5000 м. Простирание поднятия северо-северо-западное. Углы наклона склонов поднятия составляют в среднем 1°, но отдельные уступы имеют наклон 16-19°. По данным ГСЗ под поднятием наблюдается погружение поверхности М до 22-24 км, т.е. на 12-14 км глубже, чем под смежными абиссальными равнинами. Структура характеризуется тепловым потоком 41-45 мВт/м^2 в западной части возвышенности и повышенным потоком (до 75-96 мВт/м^2) в восточной и

юго-восточной частях. Мы высказали предположение, что западная часть возвышенности Шатского испытала в позднем мезозое шарьирование фрагментов океанических пластин. Это вызвало экранирование глубинного теплового потока, который до настоящего времени не пришел к стационарному состоянию [3]. Однако эта модель пока не получила подтверждения и может рассматриваться как предварительная. Для объяснения причин повышения потока требуется дополнительная информация о глубинном строении структуры. На возвышенности Хесса тепловой поток имеет примерно те же значения, что и в западной части возвышенности Шатского, т.е. 42-47 мВт/м^2. По-видимому, геодинамическая история этих структур Северо-Западной плиты Тихого океана была сходной.

Внутри этой самой крупной абиссальной котловины встречаются уникальные образования, такие как Гавайская «горячая точка» под островом Гавайи и ее палеогеологическая траектория, выраженная цепочкой Императорского хребта. В районе траектории Гавайской горячей точки архипелага имеется более 200 измерений теплового потока [4,5], но они не выявили каких-то ураганно высоких значений. Фоновый тепловой поток здесь составляет 57±4 мВт/м^2 и незначительно (на 5-10 мВт/м^2) повышается в районе Гавайского поднятия, выраженного в рельефе дна. Считается, что разгрузка глубинного тепломассопотока под островом Гавайи локальна и сопровождается прогревом подлитосферной мантии на 100-150°С относительно фоновых температур только в пределах вулканических очагов. Несомненно, что полный вынос энергии под островом Гавайи на порядок и более превышает измеренное значение кондуктивного теплового потока. Но он складывается не только из кондуктивных, но и из конвективных (адвективных) теплопотерь, которые могут быть рассчитаны теоретически на основе данных об объемах изливающейся магмы.

Количество тепла, переносимого восходящей адвекцией магмы из астеносферы, приблизительно равно $Q \approx \rho_{ср} jT$, где j – скорость ее вертикальной миграции (~$2 \cdot 10^{-10}$ м/с), ρ=2800 кг/м^3 – плотность магмы; c_p=1050 Дж/(кг·К) – ее удельная теплоемкость при постоянном давлении; T=1300°С – ее температура. При таких значениях сомножителей конвективный вынос тепла оценивается величиной $Q \approx 800$ мВт/м^2. По-видимому, именно такая оценка плотности теплового потока адекватна величине полного выноса энергии в «горячей точке».

Восточную часть абиссальной котловины в широтном направлении пересекают трансокеанские или демаркационные [6] трансформные разломы, генетически связанные со спредингом в Восточно-Тихоокеанском поднятии. В пределах абиссальной котловины мы можем проследить только пассивные части этих разломов. Их активные части скрыты под Северо-Американским континентом. Но и пассивные их части представляют собой глобальные структуры, простирающиеся на тысячи километров. Зоны разломов выражены сбросовыми обрывами, простирающимися к западу от побережья на расстояние более 3000 км – до Императорского хребта. Наибольшая высота обрывов достигает 3200 м, а наименьшая – 1520 м. Морфологически зоны разломов выражены подводным хребтом асимметричного профиля с крутым (до 28°) южным склоном и пологим – северным (2-5°). Наиболее выраженные в рельефе дна разломы Сервейер, Мендосино, Пайонир, Мерей, Молокаи, Кларион, Ривера, Сикейрос, Клиппертон. Последние три названных разлома пространственно относятся к океанической плите Кокос, а все остальные – к плите Пацифик.

В отличие от активных частей пассивные части трансформных разломов не имеют специфического выражения в геотермическом поле. Тепловой поток в них закономерно меняется по мере изменения возраста второго слоя океанической коры, поэтому восточные фланги этих трансформных разломов характеризуются более высоким тепловым потоком. Здесь нередки значения 150-180 мВт/м^2, в то время как на западном фланге мы повсеместно встречаем значения от 60 до 80 мВт/м^2.

Юго-восточная часть Тихого океана характеризуется весьма неоднородным тепловым потоком, что обусловлено пестрой геометрией литосферных плит и разнотипной их кинематикой в новейшее время. Северной границей рассматриваемой зоны можно считать рифтовую зону Колима в центральной части Мексики, которая имеет подводное выражение в виде рифтового поднятия Эль-Гордо, а южной границей – разлом Элтанин. С запада зона ограничена Восточно-Тихоокеанским поднятием (ВТП), а с востока – побережьем Южной Америки. В этой части акватории располагаются три плиты, в которых проявляется современная тектоно-вулканическая активность. Это, с севера на юг, плиты Кокос, Наска и Чилийская.

Плита Кокос имеет специфическую южную границу – субширотный Галапагосский рифт. Он разделяет примыкающие к ВТП с востока и ныне расходящиеся океанические плиты Наска и Кокос. Раздвиг плит происходит неравномерно, с постепенным увеличением его скорости к востоку. Поэтому Галапагосский рифт кажется не одним из равноправных элементов зоны тройного сочленения типа «рифт-рифт-рифт», а скорее структурой типа *pull-apart*, положение которой в плане относительно ВТП напоминает кинематику «*propagating fission*» (распространяющееся расщепление).

Наиболее геотермически изучена в Юго-Восточной Пацифике впадина Хесса, которая образована стыком ВТП с субширотным Галапагосским рифтом. Центр впадины Хесса лежит в точке 2° с.ш.

и 101° з.д., примерно в 60 км к востоку от гребня ВТП. Впадина находится как бы в «острие клина», образованного хребтами, ограничивающими плиты Кокос и Наска. Морфоструктура впадины изучена довольно подробно американскими учеными [7] и отечественными исследователями в 8-м и 14-м рейсах НИС «Дмитрий Менделеев» и 24-м рейсе НИС «Академик Курчатов» [1]. Глубина впадины превышает 5 км, крутизна ее бортов достигает 20°.

В районе впадины Хесса и Галапагосского рифта определено 30 значений теплового потока, а еще 28 – вдоль простирания этой зоны на западном склоне ВТП. Анализ этих значений на разных флангах ВТП выявил асимметрию его распределения относительно оси поднятия (рис. 2). Западнее этой оси кондуктивный ТП составляет в среднем 74±51 (n_1=29), а восточнее – 36±29 мВт/м^2 (n_2=29). Геотермическая асимметрия ВТП в этом его сегменте статистически достоверна: сравнение выборок с помощью критерия Стьюдента дало значение t=3.42 при $t_{кр.}$=2.20; n=58.

Район Галапагосского рифта и впадины Хесса имеют морфологическое выражение только восточнее оси ВТП. Поэтому, на первый взгляд кажется странным, что восточный склон ВТП имеет более низкий средний тепловой поток, по сравнению с западным (см.рис. 2). Однако, если вспомнить, что раскрытие Галапагосского рифта происходит клинообразно в западном направлении, то становится вполне объяснимым повышение теплового потока на западном склоне ВТП, т.к. в «острие клина» сосредоточена максимальная энергия, заставляющая его раскрываться и продвигаться далее на запад. Естественно, что величина этой энергии выражается в тепловом потоке. Можно предположить, что в этом регионе в ближайшем геологическом будущем не будет различия в тепловых потоках абиссальных котловин, т.к. «галапагосский клин» не продвинулся еще в пределы абиссали на плите Пацифик и не имеет там морфологического выражения. Но обоснованный вывод возможен только после проведения измерений теплового потока на западном продолжении Галапагосского геотраверса.

В структуре плиты Наска выделяются несколько глыбовых и глыбово-вулканических поднятий. Как показали геотермические измерения, проведенные нами по профилю «г. Кальяо – разлом Элтанин» в 24-м рейсе НИС «Академик Курчатов», тепловой поток коррелирует с плотностью и интенсивностью подводного вулканизма. Так, на поднятии Сала-и-Гомес известно более 20 активных подводных вулканов, и тепловой поток здесь изменяется от 70 до 88 мВт/м^2 ($q_{ср.}$=78 мВт/м^2), а на поднятии Наска, где не известны проявления современного подводного вулканизма, тепловой поток изменяется от 50 до 75 мВт/м^2 при среднем значении – 63 мВт/м^2. Самая южная – Чилийская абиссальная котловина характеризуется наибольшими глубинами океана. При средней глубине 6500 м здесь нередки впадины с глубиной более 7 км. В геотермическом отношении впадина охарактеризована недостаточно полно. Имеется всего четыре измерения теплового потока. Но даже по ним можно судить о существовании зависимости величины теплового потока от возраста второго слоя океанической коры. Вблизи ВТП тепловой поток составляет 90 мВт/м^2, а при приближении к побережью Чили монотонно снижается до 56 мВт/м^2.

Таким образом, среди абиссальных котловин Пацифики заметно явное повышение теплового потока в более южных абиссальных котловинах. Сравнение выборок показало, что средние значения теплового потока статистически различны в отдельных плитах юго-восточной Пацифики. Наибольшим тепловым потоком характеризуется плита Кокос. Здесь тепловой поток составляет 88±34 мВт/м^2. Для объединенной выборки плит Наска и Чилийской рассчитано значение теплового потока 62±4 мВт/м^2. Ниже этого значения средний тепловой поток в Северо-Западной котловине – 58±8 мВт/м^2, который, однако, статистически неотличим от котловины Наска.

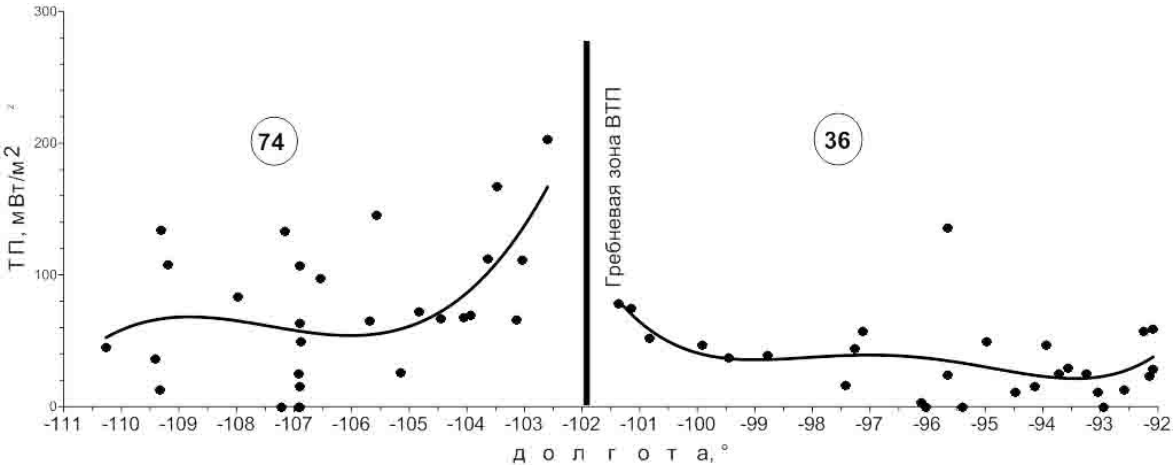

Рис. 2. Профиль теплового потока вдоль 2°с.ш.

Абиссальные котловины Атлантического океана

Анализ данных теплового потока в абиссальных впадинах Атлантики показал некоторое увеличение его среднего значения в западных котловинах (55-63 мВт/м^2) по сравнению с восточными, где средний тепловой поток равняется 46-57 мВт/м^2. Исключением является тепловой поток на геотраверсе 31° ю.ш., где он составляет 32 мВт/м^2 в Бразильской абиссальной котловине [8].

Геотермическую и структурную асимметрию хорошо видно на блок-модели по Анголо-Бразильскому геотраверсу (рис. 3). Большинство геотермических данных по этим геотраверсам были получены во время многолетних экспедиционных геолого-геофизических исследований ВНИИОкеангеология, направленность которых состояла в изучении глубинного геолого-геофизического строения акватории по геотраверсам Атлантического океана [9,10,11,12].

На примере наиболее хорошо изученного Анголо-Бразильского геотраверса обсудим причины наблюдаемой геотермической асимметрии Срединно-Атлантического хребта (САХ). 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. В центральной части геотраверса

Таблица 1

Результаты статистической обработки геотермических данных по геотраверсам Атлантики

Геотраверс	Средний тепловой поток/стандартное откл., мВт/м^2						
	Склоны хребта			Абиссальные котловины			Гребневая зона
	Западный	Восточный	*t*-тест	Западная	Восточная	*t*-тест	
45° с.ш.	52_{18}[1]/21	58_{16}/23	+[2]	–	69_{53}/18	Не определен	189_{11}/102
Канаро-Багамский	50_{31}/26	44_{28}/21	+	52_{231}/14	46_{76}/14	+	177_{11}/97
19° с.ш.	40_{21}/15	43_{6}/15	–	–	55_{15}/22	Не определен	–
2° с.ш.	55_{17}/21	51_{6}/16	+	54_{13}/7	59_{33}/10	+	64_{2}
Анголо-Бразильский	61_{76}/24	41_{67}/23	+	60_{63}/21	50_{49}/16	+	75_{11}/100
31° ю.ш.	39_{13}/21	34_{8}/14	+	32_{4}/10	56_{8}/13	+	–

Примечание: [1]в нижнем регистре – количество измерений;
[2]статистически значимое отличие выборок – (+); незначимое отличие – (–)

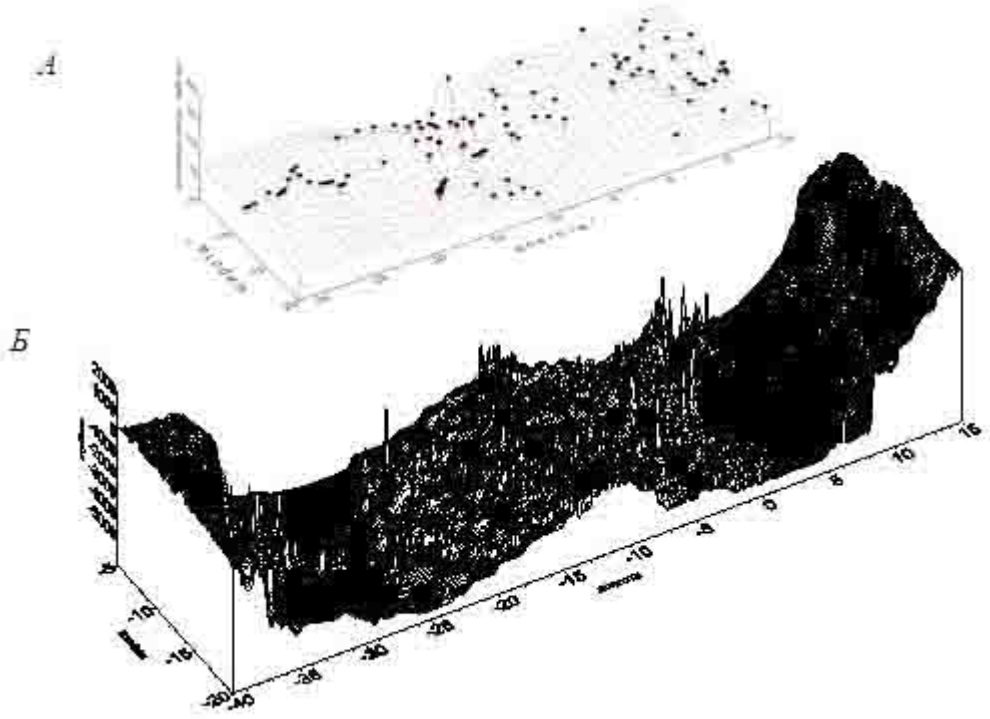

Рис. 3. Блок-схемы теплового потока (А, черные точки – станции измерений теплового потока) и рельефа дна (Б) вдоль Анголо-Бразильского геотраверса

располагается Срединно-Атлантический хребет (см. рис. 3), по обе стороны которого лежат абиссальные плиты (Ангольская и Бразильская котловины) и сопряженные с плитами окраинно-материковые флексуры (Африканский и Южно-Американский континентальные склоны с подножьями). Перечисленные структуры первого порядка осложнены системой подчиненных и наложенных морфоструктур: выделяются мозаично-ячеистые и линейно-грядовые поднятия, плато, троги, вулканические постройки центрального типа (см.рис. 2). Несмотря на плавные в целом сопряжения структур, продольные относительно срединного хребта зоны контактируют по сбросам. Исходя из ландшафтных характеристик (размер, амплитуда, выдержанность ориентировки), отмечается асимметрия крыльев срединного поднятия: при формировании базальтового ложа тектоно-магматическая деятельность наиболее интенсивно проявилась на западном «бразильском» крыле [10].

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 [9]. 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 сейсмического профилирования 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 М. Хотя эти швы не выражены ни в рельефе дна, ни в гравитационном поле, тем не менее, их структурный план дает основание предположить асимметрию обусловивших их тектонических процессов. На Ангольском шве наблюдается надвигание океанической литосферы по поверхности палеоконтинентального склона в сторону континента, а на Бразильском – листрическое сползание.

Наблюдаемая асимметрия в глубинной структуре и в магнитном поле склонов и абиссальных котловин вдоль геотраверса связана, естественно, с различием в энергетике геодинамических процессов, о чем можно судить на основании анализа геотермических данных.

Обсуждая причины геотермической асимметрии хребта, можно в первом приближении согласиться с авторами работы [10, с. 21], которые объясняют ее «...отсутствием единого механизма формирования океанической литосферы», но полученные нами результаты заставляют предположить наличие вторичных процессов активизации, которые в большей степени проявились на западном фланге хребта в полосе геотраверса.

Этот вывод основан на расчете времени установления стационарного геотермического режима после «включения» источника тепла. Источник обычно ассоциируется с существованием долгоживущей зоны фракционного плавления мантийного вещества на границе океанической литосферы и астеносферы. Глубина этой границы растет по мере удаления от зоны спрединга, что связано с релаксацией мощности тепломассопотока в срединном хребте и кристаллизацией астеносферного вещества. Если бы асимметрия обусловливалась только различными механизмами формирования океанической литосферы, то при ее мощности в 40-50 км, характерной для полосы между аномалиями №10 по обе стороны хребта уже через 25 млн лет (при температуропроводности $a=5\cdot10^{-7}$ м^2/с) установится стационарный тепловой режим в литосфере, и различия в тепловом потоке будут нивелированы.

Можно предположить или разную мощность 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 подтверждается независимыми геофизическими результатами, полученными при изучении геотраверса, а также оценками мощности литосферы по данным о батиметрии дна [13,14]. Второе предположение более реально, так как структурная неоднородность и наличие наложенных тектонических процессов в сформировавшейся литосфере подтверждается данными магнитометрии и сейсмического профилирования.

Относительное повышение теплового потока на западном фланге хребта может быть обусловлено наличием листрических сбросов, образовавшихся в результате локального растяжения и утонения литосферы, а также наличием возможного наклонного теплового источника на западном склоне хребта. При этом в литосферу могли внедряться дайки мантийных гипербазитов, которые, с одной стороны, уменьшили глубину нахождения нижних кромок намагниченных тел, а, с другой стороны, привнесли дополнительное тепло при своем внедрении в более холодную литосферу. На восточном фланге хребта в результате отмеченного надвигания океанической

литосферы на палеоконтинентальный склон произошло «экранирование» глубинного теплового потока, т.е. энергия начала распространяться от более нагретой подошвы литосферы в сторону более холодной кровли палеоконтинентального склона, т.е. внутрь Земли. Естественно, это нестационарный процесс, и неестественное направление распространения энергии в теле планеты должно через некоторое время прекратиться, но при достаточно большой суммарной мощности надвинутых пластин процесс экранирования может растянуться на значительное время [15] и обусловить уменьшение наблюдаемого теплового потока, что фиксируется практически во всех конвергентных зонах с широким распространением шарьяжных структур [16].

Очевидно, эта интерпретация причин наблюдаемой геотермической асимметрии может быть распространена и на другие регионы Срединно-Атлантического хребта.

Статистическое сравнение теплового потока абиссальных котловин Атлантики показало, что находящиеся западнее САХ впадины (Багамская и Бразильская) характеризуются более высоким средним тепловым потоком, чем впадины с восточной стороны САХ (Канарская и Ангольская), соответственно, 62±3 и 52±4 мВт/м^2.

Заключение

Нами проведено статистическое сравнение теплового потока крупнейших абиссальных котловин Тихого и Атлантического океана. В соответствии с вышеизложенным принципом о «полигонном» осреднении значений теплового потока, мы сравнивали не единичные измерения, а данные по трапециям 5×5° (рис. 4).

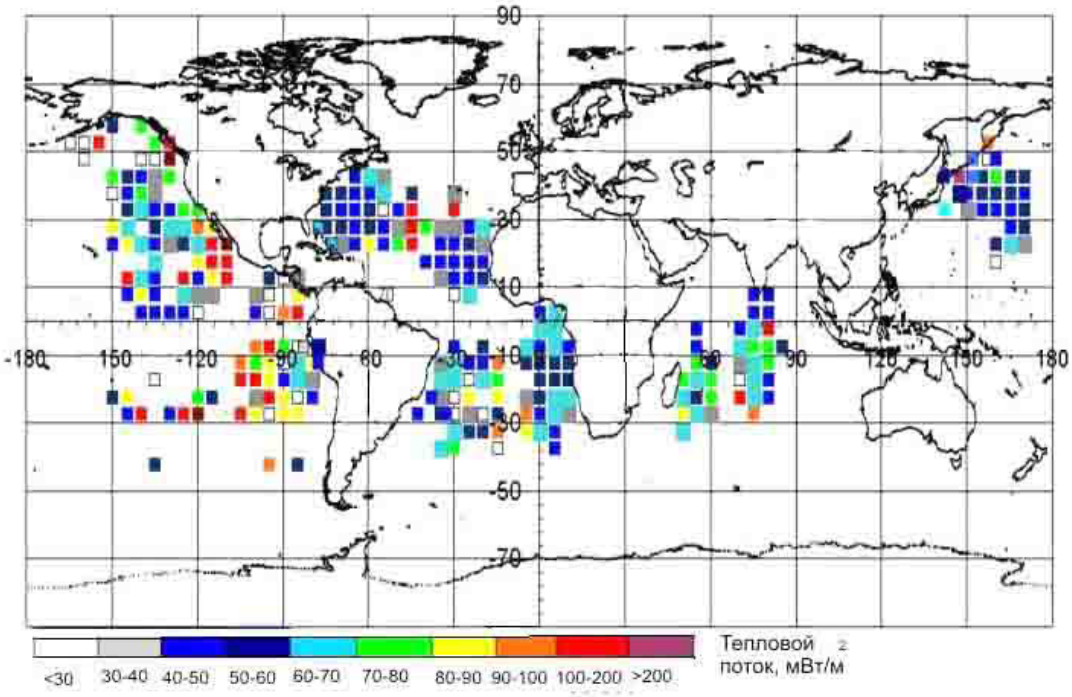

Рис. 4. Карта осредненных значений теплового потока абиссальных котловин по трапециям 5×5°

Достоверность различий средних в выборках проверялась с помощью часто применяемого в геофизике критерия Стьюдента (*t*-тест). В данном случае выполнялись два условия, благоприятные для применения именно критерия Стьюдента: соблюдение нормального распределения данных в выборках и примерное равенство дисперсий [17].

Основные закономерности, выявленные при сравнении теплового потока абиссальных котловин, следующие:

1. В Тихом океане наибольшим тепловым потоком характеризуется литосферная плита Кокос. Здесь тепловой поток составляет 88±34 мВт/м^2. Для объединенной выборки плит Наска и Чилийской значение теплового потока 62±4 мВт/м^2. Средний тепловой поток в Северо-Западной котловине ниже – 58±8 мВт/м^2, но статистически неотличим от расчетов по котловине Наска.

2. В Атлантике отмечается геотермическая асимметрия относительно гребня Срединно-Атлантического хребта. В западных котловинах (Багамская и Бразильская) средний тепловой поток примерно на 10 мВт/м^2 выше, чем в восточных (Канарская и Ангольская).

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы № 0135-2015-0021 и гранта РФФИ № 17-05-00084.

Список литературы

1. Живаго А.В. Морфоструктура дна юго-восточной части Тихого океана // Металлоносные осадки юго-восточной части Тихого океана. М.:Наука,1979. С.8-47.
2. Hilde T.W.C., Isezaki N., Wageman J.M. Mesosoic sea-floor spreading in the North Pacific // Geophys. Monography. 1976. v.19. N3. P.205-226.
3. Хуторской М.Д. Тепловой поток в областях структурно-геологических неоднородностей. М.: Наука, 1982. 79 с.
4. Sclater J.G., Corry C.E. Heat flow, Hawaiian area //Amer.Geophys.Monograph., 1967. v.63. P.324-348.
5. Von Herzen R.P., Cordery M.J., Detrick R.S. Heat flow and the thermal origin of hot spot swell: Hawaiian Swell revisited //J. Geophys.Res., v. 232. N 3. 1989. P. 856-872.
6. Пущаровский Ю.М. Демаркационные разломы в океанах как особая категория трансформных разломов // Докл. РАН. 1994. Т.335. №5. С.616-620.
7. Holden J.C., Dietz R.S. Galapagos gorge, Naz.-Co.-Pac. triple junction and Carnegie-Cocos ridges // Nature. 1972. v. 235, N. 5336. P. 266-269.
8. Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Геотермическая асимметрия срединных хребтов Мирового океана // Геотектоника. 1999. № 3. С. 21-42.
9. Погребицкий Ю.Е., Горячев Ю.В., Осипов В.А., Трухалев А.И. Строение океанической литосферы по результатам исследований на Анголо-Бразильском геотраверзе // Сов.геология, №3, 1990, С.8-22.
10. Нарышкин Г.Д., Погребицкий Ю.Е., Морфоструктура дна Юго-Восточной Атлантики // Литосфера Ангольской котловины и восточного склона Южно-Атлантического хребта. Л., 1986. С.10-23.
11. Пущаровский 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).
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. Сорохтин О.Г. Глобальная эволюция Земли. М.: Наука, 1974. 184 с.
14. Parsons B., Sclater I.C., An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age // J.Geophys.Res.,1977, v.82, N5, P.883-890.
15. Хуторской М.Д., Поляк Б.Г. Геотермические модели геодинамических обстановок разного типа // Геотектоника. 2014. № 1. С. 77-96.
16. Хуторской М.Д. Геотермия Центрально-Азиатского складчатого пояса. М.: Изд-во РУДН, 1996. 258 с.
17. Коган Р.И., Бондаренко В.Н., Чолакян П.Г. и др. Статистические методы при геохимических поисках месторождений. М.: ИМГРЭ-ОНТИ, 1973. 86 с.

Bibliography

1. Zhivago A.V. Morfostruktura dna yugo-vostochnoi chasti Tihogo okeana // Metallonosnye osadki yugo-vostochnoi chasti Tihogo okeana. M.:Nauka,1979. S.8-47.
2. Hilde T.W.C., Isezaki N., Wageman J.M. Mesosoic sea-floor spreading in the North Pacific // Geophys. Monography. 1976. v.19. N3. P.205-226.
3. Hutorskoi M.D. Teplovoi potok v oblastyah strukturno-geologicheskih neodnorodnostei. M.: Nauka, 1982. 79 s.
4. Sclater J.G., Corry C.E. Heat flow, Hawaiian area //Amer.Geophys.Monograph., 1967. v.63. P.324-348.
5. Von Herzen R.P., Cordery M.J., Detrick R.S. Heat flow and the thermal origin of hot spot swell: Hawaiian Swell revisited //J. Geophys.Res., v. 232. N 3. 1989. P. 856-872.
6. Puscharovskii Yu.M. Demarkatsionnye razlomy v okeanah kak osobaya kategoriya transformnyh razlomov // Dokl. RAN. 1994. T.335. №5. S.616-620.
7. Holden J.C., Dietz R.S. Galapagos gorge, Naz.-Co.-Pac. triple junction and Carnegie-Cocos ridges // Nature. 1972. v. 235, N. 5336. P. 266-269.
8. Podgornyh L.V., Hutorskoi M.D. Geotermicheskaya asimmetriya sredinnyh hrebtov Mirovogo okeana // Geotektonika. 1999. № 3. S. 21-42.
9. Pogrebitskii Yu.E., Goryachev Yu.V., Osipov V.A., Truhalev A.I. Stroenie okeanicheskoi litosfery po rezul'tatam issledovanii na Angolo-Brazil'skom geotraverze // Sov.geologiya, №3, 1990, S.8-22.
10. Naryshkin G.D., Pogrebitskii Yu.E., Morfostruktura dna Yugo-Vostochnoi Atlantiki // Litosfera Angol'skoi kotloviny i vostochnogo sklona Yuzhno-Atlanticheskogo hrebta. L., 1986. S.10-23.
11. Puscharovskii Yu.M., Peive A.A., Raznitsin Yu.N., Bazilevskaya E.S. Razlomnye zony Tsentral'noi Atlantiki. M.: GEOS, 1995. 163 s. (Tr.GIN RAN, vyp. 495).
12. Popova A.K., Smirnov Ya.B., Hutorskoi M.D. Geotermicheskoe pole transformnyh razlomov // Glubinnye razlomy okeanskogo dna. M.: Nauka, 1984. S.78-87.
13. Sorohtin O.G. Global'naya evolyutsiya Zemli. M.: Nauka, 1974. 184 s.
14. Parsons B., Sclater I.C., An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age // J.Geophys.Res.,1977, v.82, N5, P.883-890.
15. Hutorskoi M.D., Polyak B.G. Geotermicheskie modeli geodinamicheskih obstanovok raznogo tipa // Geotektonika. 2014. № 1. S. 77-96.
16. Hutorskoi M.D. Geotermiya Tsentral'no-Aziatskogo skladchatogo poyasa. M.: Izd-vo RUDN, 1996. 258 s.
17. Kogan R.I., Bondarenko V.N., Cholakyan P.G. i dr. Statisticheskie metody pri geohimicheskih poiskah mestorozhdenii. M.: IMGRE-ONTI, 1973. 86 s.