

## ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ЛИТОСФЕРЫ ГАВАЙСКО-ИМПЕРАТОРСКОЙ СИСТЕМЫ ХРЕБТОВ (ТИХИЙ ОКЕАН) ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2006 г. Е. В. Вержбицкий, М. В. Кононов, А. Ф. Бяков, В. П. Дулуб

Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36

Поступила в редакцию 19.11.2004 г.

Анализ геолого-геофизических данных в районе Гавайско-Императорской системы хребтов указывает, что генезис литосферы хребтов не соответствует геотермической модели образования океанического дна. С целью выявления закономерностей формирования Гавайско-Императорской цепи был проведен детальный тектонический анализ основных структур северной части Тихого океана и построена карта геотермической и геомагнитной изученности и распределения возраста дна региона. На основе базы батиметрических данных по Мировому океану были выполнены модельные расчеты параметров погружения литосферы, термически омоложенной веществом плюма после прохождения Тихоокеанской плиты над Гавайской горячей точкой. Рассчитанные параметры указывают, что скорость погружения литосферы, испытавшей термическое омоложение, значительно меньше скорости погружения литосферы спрединговой природы. Получено эмпирически соотношение, описывающее процесс резкого воздымания и дальнейшего погружения океанического дна во время движения Тихоокеанской плиты над Гавайским плюмом. Создана теплофизическая модель строения термически омоложенной литосферы, вызывающей на поверхности поднятий Гавайско-Императорской цепи тепловой поток, близкий измеренному тепловому потоку, что указывает на реальность предложенной модели. На базе комплекса геолого-геофизических данных и расчета распределения возраста дна северной части Тихого океана построены в абсолютной системе координат палеогеодинамические реконструкции термического процесса формирования Гавайско-Императорской системы хребтов на период времени 90–20 млн. лет.

### ВВЕДЕНИЕ

По современным представлениям литосфера океанов образуется в зоне оси спрединга. Далее, двигаясь от оси спрединга, литосфера охлаждается, а ее мощность увеличивается вследствие кристаллизации жидкой базальтовой составляющей вещества астеносферы на подошве литосферы. В соответствии с геотермической (кристаллизационной) моделью остывания движущейся литосферной плиты, увеличения ее мощности и тяжести и изостатического погружения в астеносферу, глубина погружения фундамента океанической коры может быть представлена как [12, 42]:

$$H = H_0 + Kt^{1/2}, \quad (1)$$

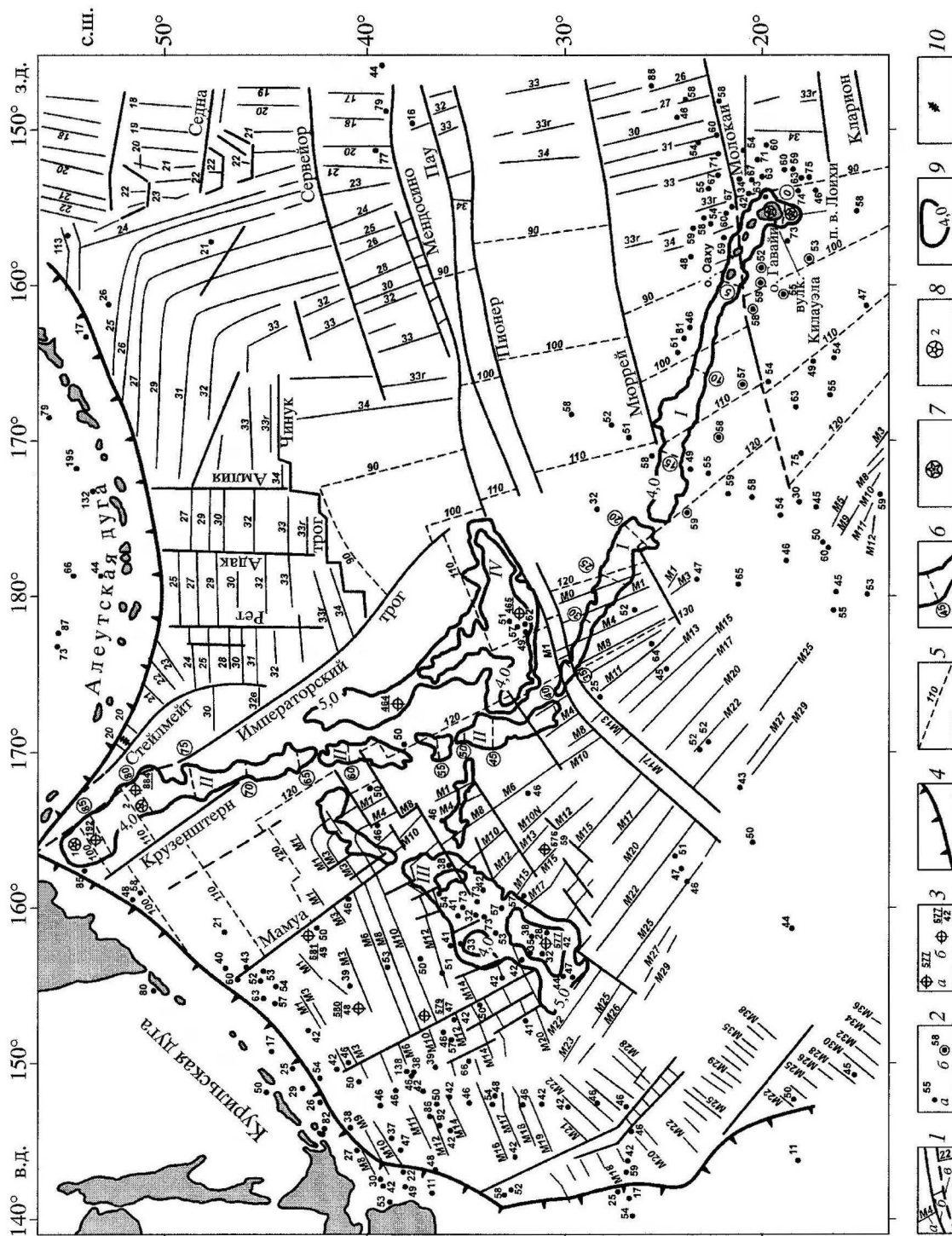
где  $H$  – глубина фундамента океанической коры, в км;  $H_0$  – глубина над гребнем срединно-океанического хребта, в км;  $K$  – коэффициент, характеризующий скорость погружения фундамента, в км/(млн. лет)<sup>1/2</sup>;  $t$  – возраст фундамента, в млн. лет. Для средней глубины срединно-океанических хребтов и средней скорости погружения фундамента  $H_0 = 2.6$  и  $K = 0.345$ .

На основании геотермической модели процесс остывания океанической литосферы описывается соотношением (теоретической геотермической кривой):

$$q = \gamma t^{-1/2}, \quad (2)$$

здесь  $q$  – тепловой поток, в мВт/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий скорость остывания литосферы, в мВт (млн. лет)<sup>1/2</sup> м<sup>-2</sup>;  $t$  – возраст литосферы, в млн. лет. Для средней скорости остывания литосферы Мирового океана  $\gamma = 480$ .

Анализ данных глубоководного бурения, батиметрических, геотермических, магнитных и других геолого-геофизических данных показывает, что остывание и погружение литосферы под асейсмичными хребтами океанов, такими, как Восточно-Индийский, Мальдивский и др., также происходит в соответствии с геотермической моделью формирования океанического дна, т.е. в соответствии с соотношениями (1) и (2) [57]. Следует специально отметить, что направление формирования вышеуказанных хребтов было в ос-



**Рис. 1.** Карта геотермической и геомагнитной изученности северной части Тихого океана

*I* – линейные магнитные аномалии и их номера (*a*) и трансформные разломы; *b* – достоверные, *в* – предполагаемые, по [11, 24, 32, 33, 39]; 2 – точки измерения температурного потока (мВт/м<sup>2</sup>); *a* – по данным [44, 48, 49, 51], *b* – по данным [58, 59]; 3 – скважины глубоководного бурения; *a* – номер скважины; *b* – номер скважины в числителе и тепловой поток (мВт/м<sup>2</sup>) в знаменателе; 4 – зоны субдукции; 5 – изохроны возраста ложа океана (млн. лет) в зоне мелового спокойного магнитного поля; 6 – изолинии среднего возраста Гавайско-Императорской цепи (млн. лет); 7 – действующие вулканы; подводный вулкан Лоихи и Килауэа (о. Гавайи); 8 – подводные горы Гавайско-Императорского хребта; 1 – гайот Мейджи, 2 – Детройт; 9 – изобаты, км; *I*0 – палеосеовые линейные магнитные аномалии (палеосрединговые центры). Римскими цифрами обозначены: I – Гавайский хребет, II – Императорский хребет, III – возвышенность Шатского, IV – возвышенность Хесса

новном квазиортогонально простирацию линейных магнитных аномалий.

Гавайский и Императорский асейсмичные хребты в целом находятся в зоне спокойного магнитного поля, т.е. в зоне отсутствия линейных магнитных аномалий (см. рис. 1). Отрезки прямых интерполяции возраста дна с помощью ближайших магнитных аномалий, как и сами аномалии, расположены в основном под углом к простирацию структуры хребтов. Все это в значительной мере усложняет идентификацию возраста прилегающей к хребтам литосферы.

В настоящее время наиболее известны две гипотезы генезиса Гавайско-Императорского хребта. Первая “мембранная” гипотеза предполагает образование поясов внутриплитного магматизма вследствие регионального растрескивания литосферной плиты из-за ее различной кривизны и декомпрессии мантии [55]. Однако наиболее обоснованной и практически принятой в научном мире является вторая гипотеза. Она постулирует “прожигание” движущейся литосферной плиты нижнемантийным плюмом, создающее на поверхности вулкан, который отмирает после прохождение плиты над горячей точкой [61].

Прохождение Тихоокеанской плиты над плюмом Гавайской горячей точки вызвало изменение температурного режима литосферы, образование на поверхности дна сводового поднятия (свелла) и искажение основных закономерностей, соотношения (1) и (2), геотермической модели образования океанического дна. В работах [17, 27] показано, что после прохождения Тихоокеанской плиты над плюмом произошло ступенчатое поднятие поверхности дна, изменение глубины от ~5.5 до ~4.3 км (район о-ва Оаху) и так называемое термическое омоложение литосферы. Следующее после поднятия дна погружение свелла в зависимости от увеличения его возраста осуществляется, по данным работы [17], в соответствии с соотношением (1) таким образом, как будто древняя океаническая литосфера вблизи о-ва Оаху имеет возраст не 100–95 млн. лет, определенный здесь по магнитным аномалиям, а значительно более молодой начальный возраст ~30 млн. лет (см. рис. 2). Необходимо также отметить, что возраст собственно свелла в районе о-ва Оаху, определенный по образцам изверженных пород вулканических построек Гавайской цепи, составляет лишь несколько млн. лет [16].

Учитывая процесс прохождения Тихоокеанской литосферной плиты над разогретым веществом Гавайского плюма, предполагали большую величину теплового потока в районе Гавайского хребта. Однако измеренный в районе хребта установившийся тепловой поток мал и составляет

~58 мВт/м<sup>2</sup> (см. рис. 3), что превышает теоретический фон ~45 мВт/м<sup>2</sup>, рассчитанный по формуле (2) для прилегающей к хребту старой океанической литосферы с возрастом ~100 млн. лет, на ~20%. Следовательно, формирование Гавайско-Императорской системы хребтов происходило не в соответствии с геотермической (кристаллизационной) моделью образования океанического дна.

Как было отмечено выше, регион Гавайско-Императорской системы хребтов практически находится в зоне спокойного магнитного поля, где линейные магнитные аномалии отсутствуют. Это значительно затрудняет анализ процессов эволюции региона из-за неопределенности оценки возраста дна примыкающих к этим хребтам участков ложа Тихого океана.

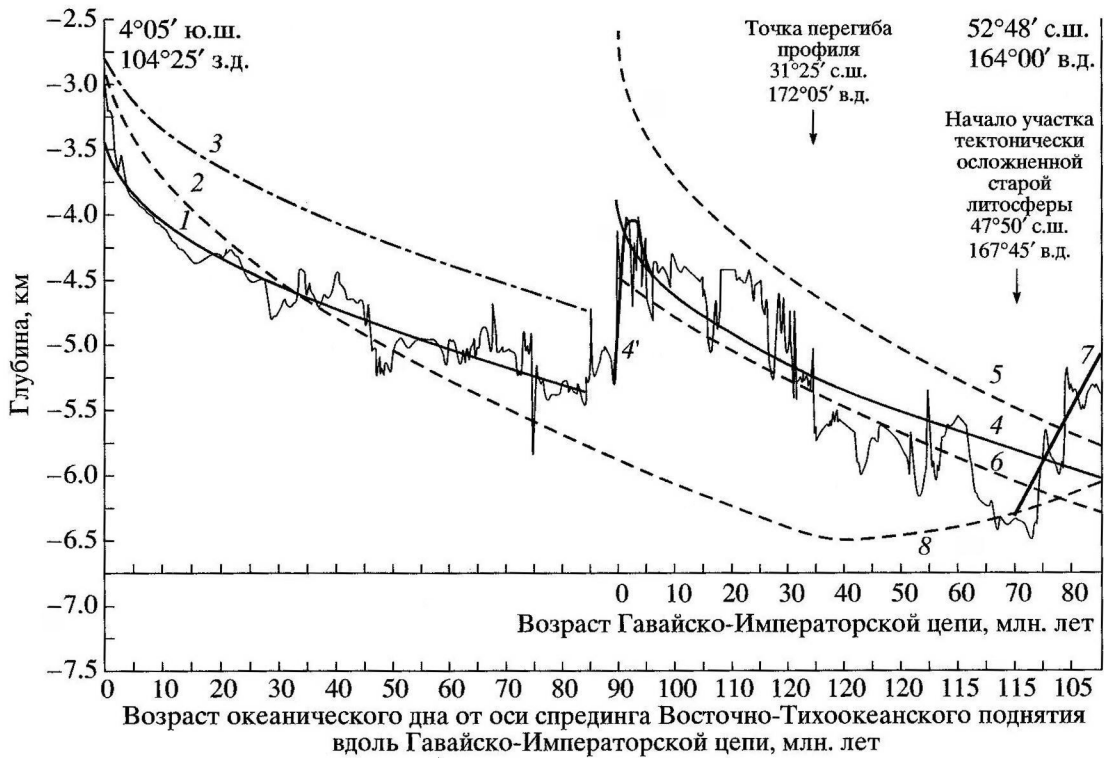
Для установления закономерностей в распределении возраста океанической коры вдоль свелла Гавайского и Императорского хребтов необходимо выполнить в этом районе детальный тектонический анализ. Это позволит оптимизировать расчеты распределения возраста дна на основе магнитных аномалий, расположенных на периферии исследуемого региона. В свою очередь, выполненные расчеты дадут возможность осуществить качественный анализ и моделирование батиметрических и теплофизических процессов генезиса Гавайско-Императорской горной цепи, а также рассчитать и построить палеогеодинамические реконструкции региона.

Данная статья посвящена выявлению указанных выше батиметрических, геотермических и геодинамических закономерностей эволюции литосферы Гавайско-Императорской системы хребтов.

## ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ГЕОТЕРМИЧЕСКОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ ИЗУЧЕННОСТИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА ДНА ТИХОГО ОКЕАНА

При составлении карты геотермической и геомагнитной изученности региона (рис. 1) использовались: магнитные данные в основном из [11], с изменениями по [24, 32, 33, 39]; геотермические данные из работ [44, 48, 49, 51, 58, 59] и др.

На большинстве карт Северной Пацифики возраст ложа дан слишком генерализовано (см., например, [30, 50]), что обусловлено наличием зоны спокойного магнитного поля, куда попадает и Гавайско-Императорская цепь. Для того чтобы аргументированно представить изохронный возраст зоны, необходимо восстановить ее тектоническую историю и, в первую очередь, – ключевых структур – возвышенности Хесса, Императорского трога (разлома), трога Чинук. Единственная детальная карта изохрон Северной Пацифики



**Рис. 2.** Аппроксимация рельефа фундамента литосферы корневой зависимостью от возраста дна в районе Гавайско-Императорской цепи

1 – расчетная зависимость термически не измененной литосферы для участка профиля от Восточно-Тихоокеанского поднятия до восточной периферии Гавайско-Императорского свода с отклонением  $\sim 30^\circ$  от нормали к простираанию осей линейных магнитных аномалий в интервале возрастов от 0 до 84 млн. лет; 2 – теоретическая зависимость рельефа от возраста, соотношение 1, в интервале возрастов 0–125 млн. лет для термически не измененной литосферы от Восточно-Тихоокеанского поднятия до западной периферии Гавайско-Императорского свода (кривая глубин на участке древней литосферы с возрастом от 125 до 115 млн. лет осреднена); 3 – то же, но с поправкой на отклонение профиля от нормали к простираанию осей магнитных аномалий; 4 – расчетная зависимость для участка термически омоложенной литосферы Гавайско-Императорского свода в интервале возрастов от 0 до 85 млн. лет; 5 – теоретическая зависимость рельефа от возраста для этого же участка и в том же интервале возрастов, соотношение 1; 6 – расчетная зависимость для того же участка при допущении возраста омоложенной литосферы от 30 до 115 млн. лет [17]; 7 – расчетная зависимость для участка древней литосферы на северо-западе Гавайско-Императорского свода, сформированной в ныне субдуцированном палеоспрединговом центре, в интервале возрастов 100–115 млн. лет; 8 – теоретическая зависимость рельефа от возраста для этого же участка и в том же интервале возрастов, соотношение 1; 4'–4 – кривая, аппроксимирующая рельеф дна Гавайско-Императорской цепи

[47] основана на модели [46] и в меньшей степени – на модели [33]. Эти модели предполагают, что: большая часть Императорского разлома представляет собой палеоспрединговый центр и, следовательно, исключает сдвиговые смещения вдоль разлома; образование возвышенности Хесса происходило вдоль оси спрединга; существовало две перестройки систем спрединга в процессе образования плиты Кула и микроплиты Чинук.

Наша модель предполагает совершенно другую тектоническую интерпретацию ключевых структур региона и основана на следующих фактах: 1. Возвышенность Хесса образовалась в районе точки тройного сочленения плит Тихоокеанская–Фараллон–Изанаги. На это указывает подобие формы и геолого-геофизического строения возвышенностей Шатского и Хесса (а коленооб-

разное сочленение линейных магнитных аномалий возвышенности Шатского как раз свидетельствует о формировании этой возвышенности в районе точки тройного сочленения плит). Возраст изверженных пород скважин DSDP 464 и 465 [56], расположенных на севере и юге вдоль длинной оси возвышенности Хесса, существенно различается (на  $\sim 10$  млн. лет). Это практически исключает возможность образования возвышенности на едином спрединговом центре Фараллон–Пацифик; 2. Императорский трог существовал как трансформный разлом, а не ось спрединга [4]; 3. Длительное время ( $\sim 95$ –83 млн. лет) трог Чинук был областью, где коленообразно сочленялись линейные морфоструктуры рельефа дна [33], маркируя тройственное сочленение плит Кула–Тихоокеанская–Фараллон; 4. Единственный пе-

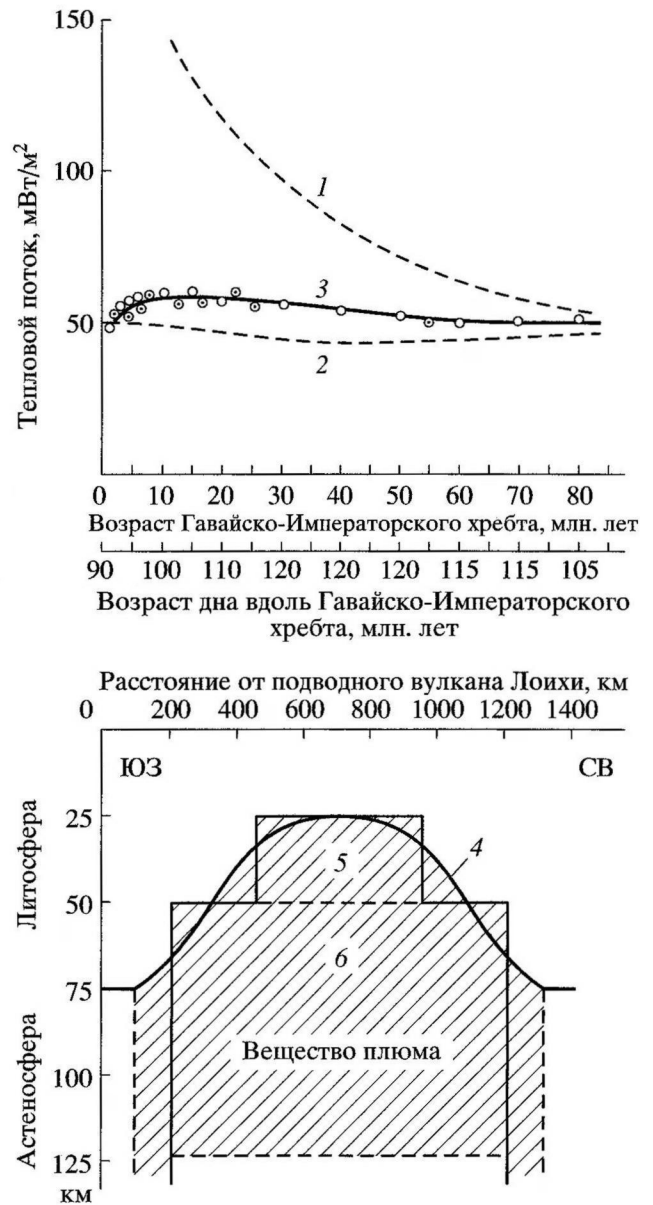
рескок (трансформация) системы спрединга от системы плит Тихоокеанская–Изагаги–Фараллон к системе Тихоокеанская–Кула–Фараллон произошел ~100–95 млн. лет назад; 5. Отсутствие необходимости существования дополнительных микролит (типа Чинук); 6. Постоянное существование точки тройного сочленения, постепенно мигрировавшей на восток (возвышенность Шатского – возвышенность Хесса – южная оконечность Императорского разлома – западная часть трога Чинук – восточная часть трога Чинук), без которой трудно объяснить рисунок линейных магнитных аномалий Севера Пацифики.

На основании карты линейных магнитных аномалий и палеомагнитной шкалы [9] был установлен возраст ложа в районах распространения линейных магнитных аномалий. Изохроны возраста ложа в области зоны спокойного магнитного поля рассчитывались в соответствии с описанной выше тектонической моделью [4]. К югу от разлома Мендосино возраст ложа интерполировался между аномалиями М0 и 34 (см. рис. 1). К северу от западного продолжения разлома Мендосино интерполяция осуществлялась между возрастом аномалий Гавайской последовательности (М1–М6) и возрастом базальтов и трахитов, вскрытых скважинами DSDP 464 и 465 на возвышенности Хесса.

К северу и северо-западу от Японской мезозойской последовательности аномалий возраст ложа омолаживается, что указывает на субдуцировавшийся в прошлом спрединговый хребет. При расчете возраста дна мы использовали экстраполяцию средней скорости спрединга внутри последовательности.

Мы предполагаем, что северное окончание Императорского разлома продолжается далее на север по северо-восточной границе Императорской цепи подводных гор. Дело в том, что между разломами Стейлмейт и Императорским, если судить по интерпретации аномалий 32b–30 (см., например, [24]), участок ложа должен омолаживаться в направлении на северо-запад. Однако видно, что подводная гора Детройт (51°27' с.ш., 168°20' в.д.) имеет возраст 80 млн. лет [45], что не согласуется с возрастом, найденным здесь по магнитным аномалиям (моложе, чем 66 млн. лет, для 30 аномалии). Получается, что ложе рядом с этой горой должно быть как минимум этого же возраста (ибо возраст океанского ложа не может быть моложе возраста расположенной на ней структуры). Это неизбежно заставляет нас провести продолжение Императорского разлома на север.

Рассмотрим участок океанического ложа, расположенный к северу от разлома Мендосино, между возвышенностью Хесса и Императорским



**Рис. 3.** Аппроксимация Гавайского плюма двумя модельными призмами, вызывающими на поверхности Гавайско-Императорской цепи тепловой поток, близкий измеренным значениям

1 – теоретическая геотермическая кривая, соотношение 1, построенная для распределения возраста дна сводового поднятия Гавайско-Императорской цепи; 2 – то же, но для распределения возраста дна ложа Тихого океана вдоль Гавайско-Императорской цепи; 3 – кривая, описывающая тепловые потоки, измеренные на своде цепи (кружки с точкой [58, 59]) и рассчитанные в соответствии с теплофизической моделью тепловые потоки (полые кружки); 4 – верхняя граница вещества Гавайского плюма; 5 и 6 – модельные призмы

разломом [8], а также между разломом Крузенштерн и продолжением Императорского разлома. Имеющийся здесь линейный рисунок рельефа дна [33] подтверждает разломную природу Импе-

раторского трога. Коленообразные сочленения линейных морфоструктур рельефа ложа указывают на миграцию в этом районе точки тройного сочленения плит с возвышенности Шатского на возвышенность Хесса.

Рисовка изохрон в настоящей работе существенно отличается от рисовки изохрон 120–90 млн. лет в [47] (зоны спокойного магнитного поля) из-за разной трактовки природы возвышенности Хесса и Императорского разлома. Как было показано выше, эти структуры никогда не были простыми зонами линейного спрединга, как предполагается в [33, 47]. Здесь следует отметить лишь основные отличия в интерпретации нами возраста ложа по магнитным и геологическим данным [4]: 1. Построенные в данной статье изохроны ориентированы субперпендикулярно Императорскому разлому, а не вдоль него, как в [47]; 2. В работе [47] из-за допущения двух перестроек систем спрединга к северу от Мендосино дважды повторяются субмеридионально ориентированные изохроны 90 и 100, 130–115 млн. лет, трижды – 105–110 млн. лет, причем на западе кора 130–125 млн. лет соседствует с корой 80 млн. лет. В нашей интерпретации нет таких усложненных моделей; единственное место, где “сдвоены” изохроны 110 млн. лет – это район между разломом Крузенштерн и возвышенностью Хесса и Императорским разломом, что вполне объяснимо, если учесть здесь миграцию точки тройного сочленения плит.

Возраст молодой, наложенной на древнее океанское ложе, структуры Гавайского и Императорского хребтов закономерно удревняется от современного подводного вулкана Лоихи на юге до установленного глубоководным бурением возраста 80 млн. лет на подводной горе Детройт на севере [45]. Мы нанесли на карту усредненные возрасты Гавайско-Императорской цепи с шагом 5 млн. лет. Для этого были использованы данные бурения и драгирования [16, 19, 28, 45]. На карте хорошо видно, что вдоль цепи не наблюдается простое линейное увеличение возраста, как у [16, 28], что обусловлено дискретностью скорости движения Тихоокеанской плиты в процессе формирования Гавайско-Императорского хребта.

Значения теплового потока наносились на карту, в основном, в виде единичных измеренных (погружными термоградиентографами) значений ( $\text{мВт/м}^2$ ). В случае, когда встречалось два и более значений, полученных (в соответствии с координатами) практически в одной точке в масштабе карты, и эти значения отличались одно относительно другого в несколько раз, на карту наносилось только одно значение, наиболее близкое здесь к теоретическому тепловому потоку.

Если различие измеренных в одной точке значений теплового потока не превышало 25%, на карту наносилось лишь среднее значение.

Тепловой поток, который был измерен в скважинах глубоководного бурения, обозначался числом в знаменателе дроби (в числителе ставился номер скважины).

Для моделирования теплофизических процессов в литосфере при прохождении Тихоокеанской плиты над плюмом использовались данные высокоточной геотермической съемки из работ [58, 59].

## РЕЛЬЕФ ДНА И СПЕЦИФИКА ЭВОЛЮЦИИ ГАВАЙСКО-ИМПЕРАТОРСКОЙ СИСТЕМЫ ХРЕБТОВ

Как уже отмечалось выше, остывание литосферы по мере отодвигания ее от оси спрединга приводит к кристаллизации вещества астеносферы на подошве литосферы и наращиванию снизу мощности новообразованной литосферы. Связанный с изостатическим равновесием плиты этот процесс обуславливает термическое погружение литосферы. По мнению Р. Хистенда и С. Краха [23], идеальной является лишь сама корневая зависимость, соотношение (1), характеризующая термическое остывание литосферы с возрастом по мере удаления от оси срединно-океанического хребта. Однако хорошо известны резкие отклонения от корневой зависимости в виде внутриплитных сводовых поднятий, вулканических подводных гор, хребтов, обширных положительных аномалий глубин, обусловленных следами горячих точек. Горячая точка не только “прожигает” плиту и создает вулканическую цепь, но и формирует длительно существующую тепловую аномалию и связанную с ней обширную область (до 800–1000 км в диаметре) приподнятой литосферы. Из-за изменения термического режима литосферы при прохождении плиты над горячей точкой здесь происходит уменьшение ее мощности и изостатический подъем, в результате чего литосфера как бы термически омолаживается и приобретает относительно иной возраст (как правило, на несколько десятков млн. лет меньше). В дальнейшем, по мере отодвигания от горячей точки, термически омоложенная литосфера вновь погружается по закону корневой зависимости, но глубина фундамента в пределах обширной полосы дна, приуроченной к следу горячей точки, остается значительно меньшей, чем должна быть по корневой зависимости глубины от возраста дна для литосферы, не прошедшей над плюмом.

Мы предприняли попытку сравнить особенности термического погружения океанической литосферы, подверженной и не подверженной вли-

янию горячих точек. Для этого были выбраны участок океанической литосферы от Восточно-Тихоокеанского поднятия до восточной оконечности Гавайского хребта и, соответственно, сводовое поднятие Гавайско-Императорской вулканической цепи.

Из базы цифровых данных ЕТОРО-5, представляющей собой массив глубин и высот рельефа твердой поверхности Земли, осредненных по 5-минутным трапециям, сформировано 3 параллельных один другому профиля рельефа от гребня Восточно-Тихоокеанского поднятия ( $4^{\circ}05'$  с.ш.;  $104^{\circ}25'$  з.д. – координаты начальной точки среднего профиля) до крайней северо-западной точки Императорского хребта ( $52^{\circ}48'$  с.ш.;  $164^{\circ}00'$  в.д.). Расстояние между соседними профилями составляет 100 км. Восточные отрезки профилей проложены в направлении простирания Гавайского хребта (до  $31^{\circ}25'$  с.ш.;  $172^{\circ}05'$  в.д. – координаты точки перегиба среднего профиля), то есть под углом  $60^{\circ}$  к направлению спрединга, а западные отрезки – в направлении простирания Императорского хребта. Расстояние между точками отметок глубин вдоль профилей не превышает 9 км. Отметки высот и глубин вне узлов координатной сетки базы данных рассчитывались линейной интерполяцией между двумя ближайшими точками сетки. Аппроксимируя рельеф по трем профилям вкрест простирания Гавайско-Императорской вулканической цепи, вычислили поверхность сводового поднятия без учета влияния вулканических построек и сформировали один синтетический профиль рельефа Гавайско-Императорского свода вдоль его апикальной части.

Для получения глубины фундамента океанической коры необходимо, вычитая мощность осадочного чехла, учесть изостатическое поднятие фундамента, вызванное снятием нагрузки осадков. Для этого вычислялись поправки на изостатическое прогибание фундамента океанической коры под действием осадочной толщи по методике, описанной в работе [31]. Так как на всем протяжении профилей мощность осадков не превышала 2 км, то использовалась формула:

$$D_c = D_w - 0.763S + 0.124S^2, \quad (3)$$

где  $D_c$  – глубина (от уровня океана) фундамента океанической литосферы при снятом давлении осадочных пород с учетом изостатической компенсации (км);  $D_w$  – глубина столба воды (отрицательная величина; км);  $S$  – мощность осадков (положительная величина; км). Информация о мощности осадков была получена из общедоступной цифровой базы данных, представляющей собой массив значений мощности и средней плотности осадочного чехла, осредненных по 1-градусным

трапециям. На участке профиля от Восточно-Тихоокеанского поднятия до Гавайско-Императорского свода мощность осадков не превышала 450 м, а вдоль свода варьировала от 50 до 600 м. В результате расчетов каждому значению глубины на синтетическом профиле соответствовало конкретное значение мощности осадков и значение глубины фундамента океанической литосферы за вычетом осадков и с учетом поправки на изостатическое поднятие.

С использованием цифровой базы данных “Линейные магнитные аномалии” для каждой точки профиля были вычислены значения возраста океанической литосферы, сформированной в зонах спрединга (от Восточно-Тихоокеанского поднятия до Гавайев). Для отрезка профиля вдоль Гавайско-Императорского свода по данным о возрасте вулканических пород были вычислены значения возраста термически омоложенной Гавайским плюмом древней океанической литосферы в интервале от 0 до 85 млн. лет. Итоговый профиль рельефа фундамента океанической литосферы в зависимости от возраста представлен на рис. 1.

Для аппроксимации зависимости реальной глубины фундамента океанической литосферы от ее возраста существует много вычислительных методов. Самый распространенный – метод наименьших квадратов. В соответствии с ним сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений от аппроксимирующей функции должна быть минимальной. Используя для аппроксимации формулу (1), получим:

$$\sum_{i=1}^N [H_i - H_0 + Kt_i^{1/2}]^2 = \min, \quad (4)$$

где  $N$  – количество точек на профиле.

Приравняв нулю частную производную по  $K$ , имеем:

$$K = \left[ H_0 \sum_{i=1}^N t_i^{1/2} - \sum_{i=1}^N (H_i t_i^{1/2}) \right] / t_i. \quad (5)$$

Аналогично рассчитывался коэффициент  $H_0$ , характеризующий теоретическое положение литосферы нулевого возраста относительно современного уровня Мирового океана [2]. Результаты расчетов параметров  $H_0$  и  $K$  представлены на рис. 2 и в таблице 1. Расчеты производились: а) для участка океанической литосферы от Восточно-Тихоокеанского поднятия до восточной оконечности Гавайско-Императорского свода, не подверженной влиянию Гавайского плюма, в интервале возрастов от 0 до 84 млн. лет (кривая 1);

Таблица 1. Параметры термического погружения литосферы

Номера кривых на рис. 2	Коэф. $H_0$ , км (положение точки нулевого возраста относительно уровня моря)	Коэффициент термического погружения, $K$ , км/млн. лет <sup>1/2</sup>	Интервал возрастов, млн. лет	Состояние литосферы	Среднее квадратическое отклонение $\sigma$ от аппроксимирующей функции, км
1.	-3.321	0.221 (0.332)	0-84	Не омоложена	0.142
2.	-2.600	0.345	0-125	Не омоложена	
3.	-2.600	0.230	0-84	Не омоложена	
4.	-3.385	0.230	0-85	Омоложена	0.340
5.	-2.600	0.345	0-85	Омоложена	
6.	-2.517	0.333	30-115	Омоложена	0.346
7.	11.243	1.633	100-115	Литосфера осложнена тектоническими процессами	0.195
8.	-2.600	0.345	100-115	Модельная	

Примечание. В скобках – значение коэффициента  $K$ , пересчитанное для случая положения профиля вдоль нормали к магнитным аномалиям.

б) для участка термически омоложенной литосферы на всем протяжении Гавайско-Императорского свода в интервале возрастов от 0 до 85 млн. лет, найденных по драгированным образцам пород и данным бурения (кривая 4); в) для этого же участка в предположении, что термически омоложенный возраст литосферы составляет 30–115 млн. лет [17] (кривая 6); г) для древней океанической литосферы (100–115 млн. лет) северо-западной оконечности Гавайско-Императорского свода, сформированной в ныне субдуцированном палеоспрединговом центре (кривая 7). Результаты расчетов коэффициента  $K$  сравнивались с теоретическими коэффициентами из уравнения (1) [12].

Средние квадратические отклонения ( $\sigma$ ), представленные в таблице 1, показывают, что аппроксимация рельефа океанической литосферы в зависимости от корня квадратного из возраста для всех участков вполне удовлетворительна. При доверительной вероятности 95% все возможные отклонения от аппроксимирующей функции не будут превышать  $2\sigma$ , то есть 0.7 км.

Так как участок профиля от Восточно-Тихоокеанского поднятия до восточной периферии Гавайско-Императорского свода проложен под углом к направлению спрединга, то необходимо оценить в этом случае изменение параметра  $K$  в уравнении (1) для отклонения этого участка профиля на  $30^\circ$  от нормали к осям магнитных аномалий. Оценка для теоретической зависимости (1) показала, что коэффициент  $K$  (0.345) стал равным 0.230 (кривая 3). Величина поправки оценивалась из элементарной угловой пропорции.

Таким образом, для рассматриваемого участка профиля (кривые 1 и 3, соответственно) коэффи-

циенты  $K$  практически совпали (0.221 и 0.230), что свидетельствует о близости термического состояния литосферы на этом участке состоянию в модели остывающего полупространства.

Из сравнения коэффициентов термического погружения для участков под влиянием и вне влияния Гавайского мантийного плюма (кривые 4 и 1, соответственно) следует, что скорость погружения океанической литосферы, испытавшей термическое омоложение плюмом, значительно ниже (0.230) по сравнению с теоретической кривой (0.332). Это, вероятно, связано с более обширным влиянием мантийного плюма на океаническую литосферу, чем влияние термического режима в центре спрединга на Восточно-Тихоокеанском поднятии. Однако если предположить, что степень термического омоложения литосферы под воздействием мантийных плюмов не соответствует термическому состоянию литосферы “нулевого” возраста, то можно рассчитать тот диапазон возраста, при котором термическое состояние литосферы будет соответствовать теоретическому состоянию для модели остывающего полупространства. В нашем случае для омоложенной литосферы Гавайско-Императорского свода этот диапазон составляет 30–115 млн. лет (кривая 6). Так как древняя литосфера на восточной оконечности свода должна иметь возраст около 90 млн. лет, то следует сделать заключение о вероятном омоложении литосферы под влиянием Гавайского плюма на 60 млн. лет, то есть на 60–70%, что согласуется с выводами работы [17].

Хотя аппроксимация рельефа фундамента океанической литосферы на северо-западном участке Гавайско-Императорского свода вполне



удовлетворительна (среднее квадратическое отклонение менее 200 м), но параметры уравнения крайне невероятны (кривая 7). Это свидетельствует, что северо-западная периферия свода в значительной степени осложнена тектоническими процессами в результате коллизии с Алеутской и Курило-Камчатской зонами субдукции, то есть находится в совершенно не сравнимых с другими участками геодинамических условиях.

Как уже говорилось выше, прохождение Тихоокеанской плиты над Гавайской горячей точкой вызывает перегрев литосферы, ее быстрое изостатическое поднятие (примерно на 1.2 км), а затем медленное охлаждение и погружение в астеносферу. Нами было получено эмпирическое соотношение (6), описывающее этот сложный теплофизический процесс резкого воздымания и дальнейшего погружения океанического дна во время движения Тихоокеанской плиты над Гавайским плюмом.

$$H(t) = [\exp 25 \times 10^{-6} (t - \sqrt{(t-5)^2 + 10^{-4}} - 14.68 \times 10^{-1})^2 + 7095.06 \times 10^{-3}] + \left. \left\{ 16.3 \times 10^{-2} \sqrt{t + [(t-5)^2 + 10^{-4}]^{1/2}} + 49.9 \times 10^{-1} - 1202.06 \right\}, \quad (6)\right.$$

где  $H(t)$  – функция кривой, аппроксимирующей рельеф дна Гавайско-Императорской цепи, в км;  $t$  – возраст сводового поднятия цепи, в млн. лет.

Функция  $H(t)$  равномерно непрерывна во всем интервале возрастов Гавайско-Императорской цепи (0–85 млн. лет).

В таблице 2 приведены значения глубины сводового поднятия Гавайско-Императорской цепи, определенной по батиметрической кривой 4'-4 на рис. 2; величины глубин, рассчитанные по соотношению (6), и возраст свелла в точках, имеющих наибольшую погрешность (в %) аппроксимации рельефа дна.

Из таблицы видно, что относительная погрешность аппроксимации рельефа дна кривой, рассчитанной по соотношению (6), не превышает 5%.

#### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АНОМАЛЬНОГО ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГАВАЙСКО-ИМПЕРАТОРСКОЙ СИСТЕМЫ ХРЕБТОВ

На рис. 3 дано распределение измеренного теплового потока в районе сводового поднятия

**Таблица 2.** Возраст и глубина свода Гавайско-Императорской цепи

$t$	$H^{kp}(t)$	$H^*(t)$	$\sigma$
0	5.25	5.172	1.5
0.875	4.405	4.581	4.1
2.125	4.059	4.058	0.1
3.75	4.106	3.942	4
5	4.358	4.284	1.7
30	5.103	5.033	1.4
55	5.549	5.480	1.3
85	5.964	5.896	1.2

Примечание.  $t$ , млн. лет, – возраст сводового поднятия Гавайско-Императорской цепи;  $H^{kp}(t)$  – глубина поднятия, определенная по кривой 4'-4 на рис. 2;  $H^*(t)$ , км, – глубина поднятия, рассчитанная по соотношению (6);  $\sigma$ , %, – относительная погрешность аппроксимации рельефа дна.

Гавайско-Императорской системы хребтов [58, 59]. Кроме того, на рис. 3 приведена построенная по формуле (2) теоретическая геотермическая кривая 1 для омоложенной литосферы свелла и такая же кривая 2 для прилегающей к хребту древней океанической литосферы, возраст которой определен нами по рассчитанным выше изохронам. Как видно из рис. 3, поведение измеренного на свелле теплового потока, кривая 3, существенно отличается от ее теоретического распределения для омоложенной литосферы и прилегающей к ней старой литосферы. При этом измеренный тепловой поток сначала незначительно увеличивается, а затем медленно уменьшается при увеличении возраста дна в отличие от поведения теоретического теплового потока (кривые 1 и 2). Следовательно, процессу перемещения литосферной плиты над плюмом присущи свои теплофизические закономерности, отличные от геотермической (кристаллизационной) модели образования океанической литосферы. Попытка смоделировать этот процесс комбинацией двух тепловых полей (модель охлаждения пограничного слоя [41] и модель остывания литосферной плиты [34]) вызывала трудности в получении соответствия измеренных тепловых потоков и полученных теоретически. Лучшее соответствие поведения наблюдаемого и теоретического теплового потока (до ~20%) было получено при представлении плюма бесконечным горизонтальным слоем с аномальной температурой, который внедрился в тело литосферной плиты [58].

В данной статье нами предложена термическая модель, которая позволяет объяснить теплофизические процессы в литосфере и получить хорошее соответствие измеренного и рассчитанного теплового потока, а также выявить основные закономерности подъема и погружения свелла Гавайско-Императорской системы хребтов в процессе прохождения Тихоокеанской литосферной плиты над плюмом Гавайской горячей точки.

Толщина океанической (древней) литосферы в районе юго-восточной оконечности Гавайского хребта (район вулканов Килауэа и Лоихи) может быть рассчитана в рамках кристаллизационной модели по соотношению, устанавливающему связь между временем образования литосферы и ее мощностью [3, 63]:

$$H_l = (T_s/T_a)\sqrt{\pi at} = 1.6 \times 10^{-5}\sqrt{at} = 8\sqrt{t}, \quad (7)$$

где  $H_l$ , км, – мощность литосферы;  $T_s/T_a = 1200/1350^\circ\text{C}$ , отношение температур солидуса и ликвидуса базальтов мантии;  $a = 8.1 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , температуропроводность вещества литосферы;  $t$ , млн. лет, – возраст литосферы.

Возраст старой литосферы к юго-востоку от разлома Молокаи (см. рис. 1) составляет 90 млн. лет. Тогда мощность литосферы в соответствии с соотношением (7) равняется  $H_l = 75$  км. Ширина плюма в этом районе предположительно составляет 1000 км [60]. Данные параметры будут нами использованы далее при модельных расчетах.

Учитывая динамический процесс прохождения над плюмом литосферной плиты, для оценки теплового потока на поверхности Гавайско-Императорской системы хребтов мы использовали соотношение для нестационарного теплового поля [6]:

$$q = \frac{\lambda \Delta T}{2\sqrt{\pi at}} \left[ \exp\left(-\frac{h_1^2}{4at}\right) - \exp\left(-\frac{h_2^2}{4at}\right) \right] \times \left[ \Phi\left(\frac{X+L}{2\sqrt{at}}\right) - \Phi\left(\frac{X-L}{2\sqrt{at}}\right) \right], \quad (8)$$

где  $\Phi(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta \exp(-\eta^2) d\eta$  – функция ошибок;

$q$ , мВт/м<sup>2</sup>, – тепловой поток;  $\lambda = 3.1$  Вт/м К, теплопроводность вещества литосферы;  $\Delta T$  – избыточная температура при внедрении аномально разогретого слоя;  $a = 8.1 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , температуропроводность вещества литосферы;  $t$  – время;  $h_1$ ,  $h_2$  – глубина от поверхности дна верхней и нижней кромок аномально разогретого слоя;  $L$  – полуширина слоя;  $X$  – координата точки верхней кромки слоя,  $-L \leq X \leq L$ .

Моделирование показывает, что лучшее соответствие измеренного и рассчитанного тепловых потоков наблюдается при аппроксимации плюма двумя модельными призмами (слоями) (см. рис. 3), высотой, соответственно, 25 и 75 км, избыточной температурой слоя  $\Delta T = 200^\circ\text{C}$  и глубиной верхней части плюма от поверхности дна 25 км.

Здесь следует также отметить, что нижняя граница нижнего модельного слоя плюма не вносит заметного вклада в тепловой поток на поверхности свелла.

Результаты моделирования приведены на рис. 3. Максимальное различие измеренных и рассчитанных тепловых потоков не превышает в данном случае 5%, что указывает на оптимальный выбор в соотношении (8) величин параметров, используемых при моделировании.

Время диффузии тепла к поверхности дна при прохождении Тихоокеанской плиты над плюмом Гавайской горячей точки можно оценить, используя соотношение [1]:

$$t \cong \frac{h^2}{(\pi^2 a)}, \quad (9)$$

где  $h$  – мощность литосферы над плюмом;  $a$  – температуропроводность вещества литосферы.

Для принятых выше  $h = 2500$  м и  $a = 8.1 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$   $t = 2.5$  млн. лет, что хорошо согласуется с наблюдаемой тенденцией нарастания во времени измеренных значений теплового потока (см. рис. 3) в процессе его диффузии к поверхности свелла.

Оценку ожидаемой величины изостатического подъема свелла (уменьшение глубины) относительно прилегающих к Гавайскому хребту на юго-востоке участков дна после внедрения плюма в тело Тихоокеанской литосферной плиты можно выполнить по соотношению [58]

$$\Delta h = \beta d \Delta T, \quad (10)$$

где,  $\Delta h$  – абсолютная величина подъема свелла;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения вещества литосферы;  $d$  – общая высота модельных слоев плюма;  $\Delta T$  – избыточная температура, обусловленная слоями.

Для принятого для океанической литосферы коэффициента  $\beta = 3.28 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$  с учетом указанных выше параметров:  $d = 100$  км;  $2\Delta T = 400^\circ\text{C}$ ,  $\Delta h = 1.3$  км.

Такой подъем дна хорошо согласуется с перепадом глубин свелла Гавайского хребта в районе разлома Молокаи ~1.2 км (см. рис. 2).

Все это, в свою очередь, указывает на правомерность предложенной выше теплофизической модели генезиса Гавайско-Императорской системы хребтов.

### ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА ГАВАЙСКО-ИМПЕРАТОРСКОЙ СИСТЕМЫ ХРЕБТОВ И ПЛИТО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ СЕВЕРО-ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА

Гавайско-Императорская цепь является классическим примером линейной цепи океанических островов и подводных гор, возраст которых увеличивается по мере удаления от современных активных вулканов о-ва Гавайи, и, как это установлено в последнее время, от подводного вулкана Лоихи [16, 19, 22, 25, 26]. Как уже отмечалось выше, наиболее распространенной гипотезой, объясняющей этот феномен, является гипотеза горячей точки [36, 61], согласно которой линейные вулканические цепи формируются при прожигании проходящих океанических плит над стационарными плюмами. Положение последних маркируется активными вулканами, находящимися, как правило, вдали от границ литосферных плит. Наличие подобной системы стационарных плюмов дает возможность пользоваться ею для целей кинематики как независимой (абсолютной) системой отсчета), т.е. неподвижной по отношению к оси вращения Земли [13, 18, 37]. Эта система особенно удобна тем, что, в отличие от палеомагнитного метода, позволяет учесть не только широтную, но и долготную компоненту движения плиты. Тезис стационарности мантийных плюмов неоднократно проходил проверку как путем глобальной увязки относительных движений плит [7, 35, 40, 43, 64], так и палеомагнитным методом [7, 65, 54]. Исследования показывают, что только в первом приближении амплитудой перемещения одних горячих точек относительно других можно пренебречь. Такие перемещения внутри системы горячих точек Тихого океана могут достигать первых сантиметров (1–6) см/год [29]. Однако это все же в несколько раз меньше, чем скорости самих плит.

Что касается Гавайско-Императорской цепи, то абсолютная система отсчета может считаться достаточно уверенно стационарной лишь для возраста Гавайского хребта (т.е. в период 0–43 млн. лет), тогда как для возраста Императорского хребта (43–80 млн. лет) в традиционные кинематические модели [14, 19] требуется введение поправок, чтобы максимально соответствовать палеомагнитным и палеоклиматическим данным для Тихоокеанской плиты [7]. Для примера – палеомагнитные широты, полученные для керна на

подводной горе Детройт, показывают, что широта, рассчитанная по горячим точкам, отличается от измеренной на  $16^\circ$  [53]. Однако все же отметим, что в Тихом океане подтверждений подобных существенных расхождений на других линейных цепях не получено. По нашему мнению, в настоящее время только кинематическая модель движения Тихоокеанской плиты [29] максимально соответствует наблюдаемым ориентировкам и абсолютным датировкам линейных цепей подводных гор Тихого океана. Важно подчеркнуть, что нестационарность горячих точек здесь объясняется движениями между ними в направлении, субпараллельном движениям плит. Для объяснения этому явлению мы предлагаем другой механизм образования линейных вулканических цепей.

Благодаря прогреву литосферы теплом мантийного плюма вблизи горячей точки образуются довольно обширные своды, воздымающиеся над окружающим океаническим ложем, по меньшей мере, на несколько сот метров и имеющие размеры в несколько сотен километров в поперечнике (для Гавайского свелла  $\sim 1.2$  км и  $\sim 1000$  км соответственно) [15]. На вершине этого свода и располагаются Гавайские острова. Все вулканические постройки островов от подводного вулкана Лоихи и о-ва Гавайи до о-ва Кауаи расположены вдоль двух субпараллельных плавно изгибающихся кривых линий, образующих как бы гигантскую рифтовую долину [10]. Мы полагаем, что такое расположение вулканов не случайно и маркирует положение подводных каналов-разломов. Наличие подводных разломов подтверждается сейсмическими данными [16]. Эти разломы, по-видимому, являются наземным выражением глубинного разлома, дренирующего мантию, по которому как по ослабленной зоне мантийный расплав поступает на поверхность. Таким образом, скорее всего, в реальности плиты не “прожигаются” плюмом. Плюм создает сводовое поднятие, на которое напоздаст движущаяся Тихоокеанская плита. В результате из-за кривизны на гребне свода плита вспарывается разломом. Поскольку плита постоянно движется, этот разлом подобен бегущей трещине.

В общем случае скорость ее продвижения может не совпадать со скоростью движения плиты. Кроме всего, природа этой трещины, очевидно, имеет сдвиго-раздвиговой характер и заполнение трещины магмой будет происходить после периода сдвига (скола), когда появляются условия для локального раздвига, что также дает некоторый временной люфт. Эта модель, на наш взгляд, в значительной степени объединяет гипотезы горячей точки [36, 61] и мембранной тектоники [55] и снимает множество вопросов по поводу стационарности системы мантийных плюмов, т.к. хоро-

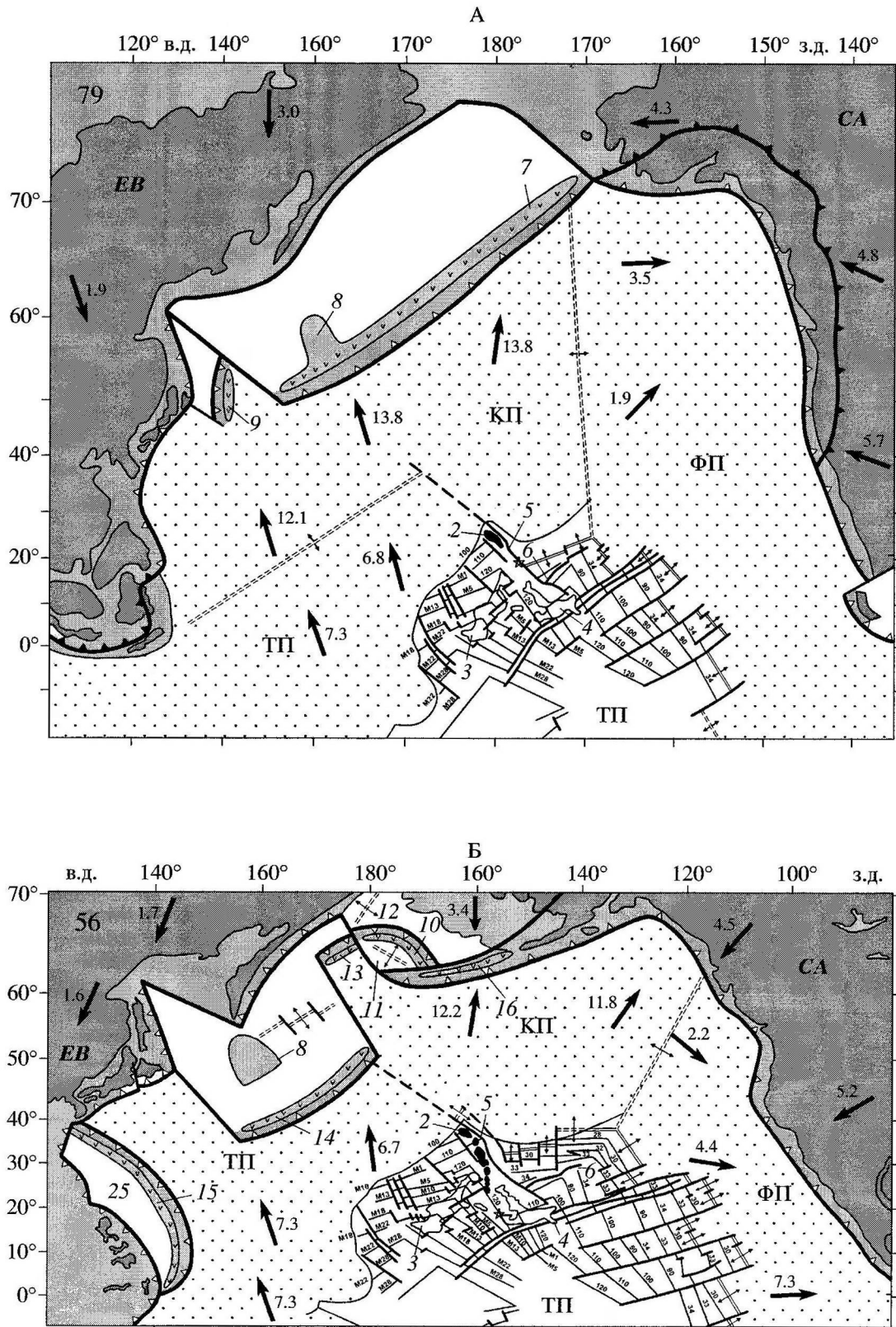
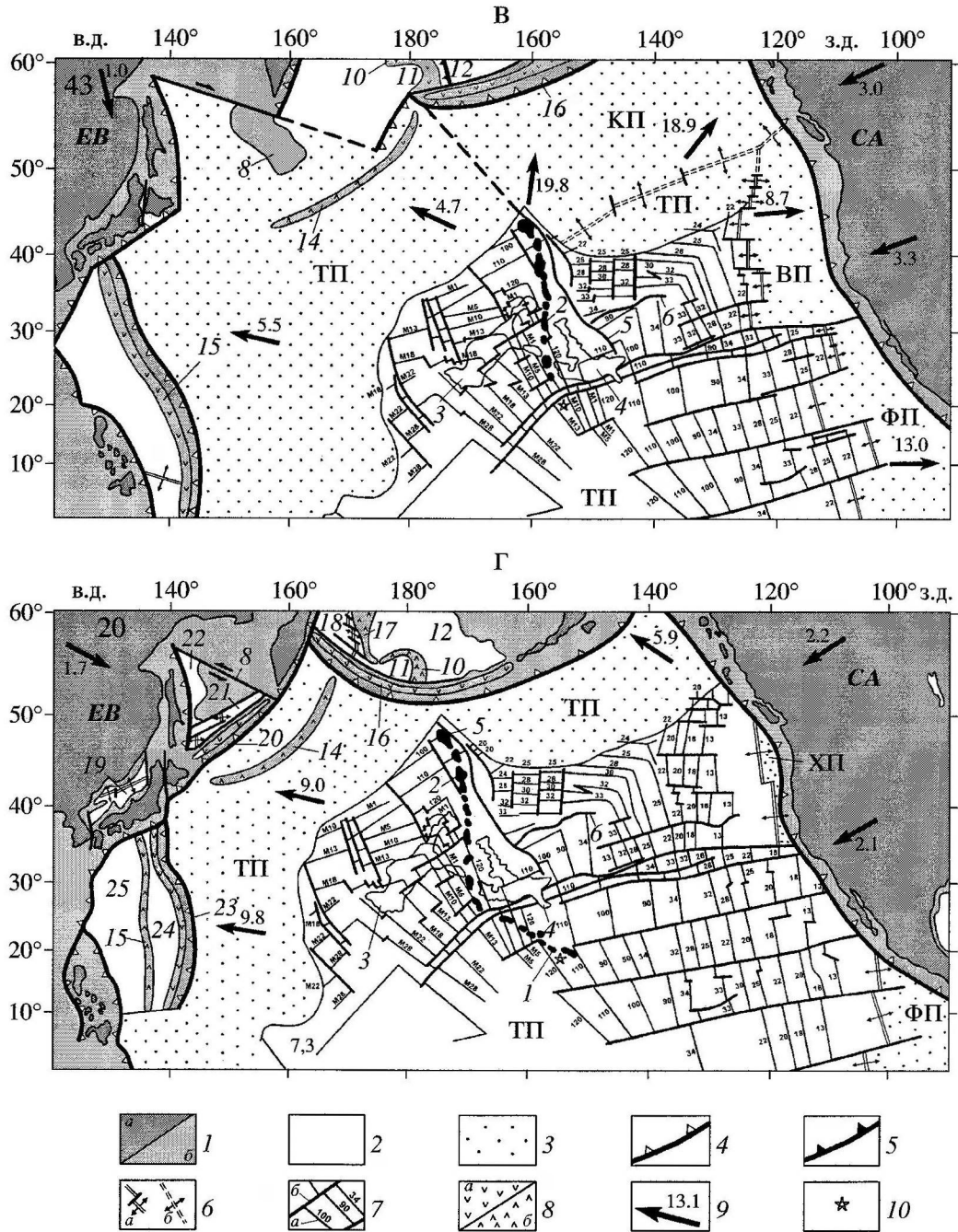


Рис. 4. (Начало).



**Рис. 4.** История формирования Гавайско-Императорского хребта, плито-тектонические реконструкции северной части Тихого океана и его континентального обрамления для: А – 79 (аномалия 33), Б – 56 (аномалия 25), В – 43 (аномалия 20) и Г – 20 (аномалия 6) млн. лет

1 – области с континентальной корой: а – суша, б – шельф и континентальный склон; 2 – области с океанической корой; 3 – поглощенная к настоящему времени океаническая кора плит: Хуан-де-Фука (ХП), Ванкувер (ВП), Кула (КП), Тихоокеанской (ТП); 4 – зоны субдукции; 5 – зоны коллизии; 6 – зоны спрединга: а – достоверные, б – предполагаемые; 7 – магнитные аномалии и их номера, а также изохроны ложа 90, 100, 110, 120 млн. лет и их возраст (а), трансформные разломы (пунктиром показано их предполагаемое продолжение) – б; 8 – океанические островные дуги: а – активные, б – отмершие; 9 – векторы абсолютного движения плит относительно системы горячих точек (см/год); 10 – современное положение подводного вулкана Лоихи как начало Гавайско-Императорского хребта. Цифрами обозначены: хребты: 1 – Гавайский, 2 – Императорский; возвышенности: 3 – Шатского, 4 – Хесса; 5 – Императорский разлом, 6 – трог Чинук; островные дуги (с использованием [5]): 7 – Ширшова–Бауэrsa–Олюторско–Озерновско–Валагинско–поднятия Витязь–Малокурильская, 9 – Восточно–Сахалинская, 10 – Бауэrsa, 13 – Олюторская, 14 – Восточно–Камчатских полуостровов – поднятия Витязь–Малых Курил, 15 – Кюсю–Палау, 16 – Алеутская, 17 – хребта Ширшова, 20 – Курильская, 23 – Ситито–Одзима–Западно–Марианская; 8 – Центрально–Охотский массив; котловины: 11 – Бауэrsa, 12 – Алеутская, 18 – Командорская, 19 – Японская, 21 – Южно–Курильская, 22 – Дерюгина, 24 – Сикоку–Паресе Вела, 25 – Филиппинская

шо объясняет, почему требуются поправки на скорость движения проявлений вулканизма над плюмом.

Таким образом, подводя итог выше изложенному, можно сделать вывод, что для целей кинематики и плито-тектонических реконструкций вполне возможно использование ориентировок линейных вулканических цепей как следов горячих точек. Только необходимо вводить некоторые поправки на скорость распространения вулканизма, чтобы получилось совпадение с движением плит. На практике такие поправки определяются независимым палеомагнитным методом. Напомним, что такая поправка для Гавайско-Императорской цепи требуется только для периода 43–80 млн. лет времени образования Императорского хребта. Эта поправка оценивается примерно в  $16^\circ$  за ~40 млн. лет (для 80 млн. лет) [54].

Эволюция во времени Гавайско-Императорской цепи показана на серии плито-тектонических реконструкций (79, 56, 43 и 20 млн. лет) северной части Тихого океана, построенных в абсолютной системе отсчета горячих точек (рис. 4). На них показано фиксированное положение подводного вулкана Лоихи как начала Гавайско-Императорской цепи. В расчетах абсолютного движения Тихоокеанской плиты использована самая точная в настоящее время модель кинематики [29]. Движения океанических плит Кула, Ванкувер, Фараллон рассчитывались по [20, 52], континентальных Северо-Американской и Евразийской плит – по [21, 28, 38]. Направления векторов абсолютного движения показывают, что в целом континентальные плиты обрамления Тихого океана направлены в сторону океана, навстречу разбегающимся в стороны по направлению к континентам океаническим плитам северной части Пацифики – Тихоокеанской, Кула, Фараллон/Ванкувер. Тектонический анализ позволяет выявить основные этапы перестройки движения литосферных плит северной части Тихого океана за последние 90 млн. лет. Первый этап начался примерно 90 млн. лет назад, когда образовалась плита Кула [62]. В это же время могла начать формироваться Императорская цепь, часть которой, вероятно, субдуцирована в Камчатском желобе. Второй этап произошел примерно 43 млн. лет назад. В это время Тихоокеанская плита на  $\sim 60^\circ$  поменяла направление своего движения с северного на северо-западное. Тогда же заложился Гавайский хребет. Важно отметить, что к Гавайской горячей точке подходило ложе Тихоокеанской плиты разного возраста, варьирующего от 100 до 135 млн. лет. Следует помнить также, что для приведения реконструкции на 79 млн. лет в соответствие с палеомагнитными данными требуется фиксированное положение Гавайской горячей точки (вулкан

Лоихи) поместить примерно на  $35^\circ$  с.ш. (к континентальным плитам окружения это не относится).

## ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ геолого-геофизических данных в районе Гавайско-Императорской системы хребтов, указывающий на несоответствие их генезиса геотермической (кристаллизационной) модели формирования океанического дна.

2. Проведен детальный тектонический анализ основных структур северной части Тихого океана и построена карта геотермической и геомагнитной изученности и распределения изохронного возраста дна региона.

3. Выполнены модельные расчеты параметров погружения литосферы хребтов, термически омоложенной веществом плюма после прохождения Тихоокеанской плиты над Гавайской горячей точкой. Расчеты указывают, что скорость погружения литосферы, испытавшей термическое омоложение, значительно меньше скорости погружения литосферы спрединговой природы.

4. Получено эмпирически соотношение, описывающее процесс резкого воздымания океанического дна (на  $\sim 1.2$  км) и дальнейшего его погружения в процессе движения Тихоокеанской плиты над Гавайским плюмом.

5. Создана теплофизическая модель строения термически омоложенной литосферы, вызывающей на поверхности швелла Гавайско-Императорской цепи тепловой поток, близкий (с погрешностью 5%) измеренному, что указывает на реальность данной модели.

6. Рассчитаны и построены палеогеодинамические реконструкции процесса формирования Гавайско-Императорской цепи в абсолютной системе координат на период времени 90–20 млн. лет.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04-05-64009).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюшков Е.В.* Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 457 с.
2. *Бяков А.Ф., Казьмин В.Г.* Пространственные вариации скоростей погружения флангов Срединно-Атлантического хребта в Центральной Атлантике // *Океанология*. 2002. Т. 42. № 3. С. 434–441.
3. *Вержбицкий Е.В.* Геотермический режим и тектоника дна акваторий вдоль Альпийско-Гималайского пояса. М.: Наука, 1996. 132 с.
4. *Вержбицкий Е.В., Кононов М.В.* Тепловой поток и геодинамика возвышенностей Шатского и Хесса

- (Тихий океан) // Океанология. 2004. Т. 44. № 3. С. 432–439.
5. Зоненшайн Л.П., Казьмин В.Г., Наманов Л.М. и др. Палеогеографический Атлас Северной Евразии. М.: Институт тектоники литосферных плит РАЕН, 2000. Компакт диск.
  6. Карслоу Г.С., Егер Д.С. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 243 с.
  7. Кононов М.В. Тектоника плит северо-запада Тихого океана. М.: Наука, 1989. 169 с.
  8. Строение дна северо-запада Тихого океана / Отв. ред. Пушаровский Ю.М., Непрочнов Ю.П. М.: Наука, 1984. 127 с.
  9. Шрейдер А.А. Геомагнитные исследования Индийского океана. М.: Наука, 2001. 319 с.
  10. Bryan C., Cooper P. Ocean-bottom seismometer observations of seismic activity at Loihi seamount, Hawaii // Mar. Geophys. Res. 1995. Vol. 17. P. 485–501.
  11. Cande S.C., Larson R.L., Pitman W.C., Golovchenko X., Dewey J.F., Haxby W.F., La Breque J.L. Magnetic lineation map of the World. N.Y.: Lamont-Doherty Geol. Observatory, Palisades, 1986.
  12. Carlson R.L., Johnson H.P. On modeling the thermal evolution of the oceanic upper mantle: An assessment of cooling plate model // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. № B2. P. 3201–3214.
  13. Chase C.G. Plate kinematics: the Americas, East Africa, and the rest of the world // Earth Planet. Sci. Lett. 1978. Vol. 37. P. 353–378.
  14. Clague D.A., Jarrard R.D. Tertiary Pacific plate motion deduced from the Hawaiian-Emperor chain // Geol. Soc. Amer. Bull. 1973. Vol. 84. P. 1135–1154.
  15. Crough S.T. Hotspot swells // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1983. Vol. 11. P. 165–193.
  16. Dalrymple G.B., Lamphere M.A., Clague D.A. Conventional and  $^{40}\text{Ar}/\text{Ar}^{39}\text{K}$  K-Ar ages of volcanic rocks from Ojin (Site 430), Nintoku (Site 432), and Suiko (Site 433) seamounts and the chronology of volcanic propagation along the Hawaiian-Emperor chain // Jackson E.D., Koizumi I. et al. Init. Reports DSDP. 1980. Vol. 55. Washington (US Government Printing Office). P. 659–676.
  17. Detrick R.S., Crough S.T. Island subsidence, hot spots, and lithospheric thinning // J. Geophys. Res. 1978. Vol. 83. № B3. P. 1236–1244.
  18. Duncan R.A. Hotspots in the southern oceans – an absolute frame of reference for motion of the Gondwana continents // Tectonophysics. 1981. Vol. 74. P. 29–42.
  19. Duncan R.A., Clague D.A. Pacific plate motion recorded by linear volcanic chains. The Ocean Basins and margins. The Pacific Ocean / Nairn A.E.A., Stehli F.L., Uyeda S. (eds). N. Y., Plenum Press, 1985. Vol. 7A. P. 89–121.
  20. Engebretson D.C., Cox A., Gordon R. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin // Bull. Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. 1985. Vol. 206. P. 1–59.
  21. Gaina C., Roest W.R., Muller R.D. Late Cretaceous-Cenozoic deformation of northeast Asia // Earth Planet. Sci. Lett. 2002. Vol. 197. P. 273–286.
  22. Garsia M.O., Jorgenson B.A., Mahoney J.J., Ito E., Irving A.J. An evaluation of temporal geochemical evolution of Loihi summit lavas – results from Alvin submersible dives // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. № B1. P. 537–550.
  23. Heestand R.L., Crough S.T. The effect of hotspots on the oceanic age-depth relation // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. P. 6107–6114.
  24. Hilde T.W.C., Isezaki N., Wageman J.M. Mesozoic sea-floor spreading in the North Pacific // The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and its Margin / Eds. Sutton G.H., Manghanani M.H., Moberly R. AGU. Washington D.C., 1976. Vol. 19. P. 205–226.
  25. Jackson E.D. Linear volcanic chains on the Pacific plate // The geophysics of the Pacific Ocean basins and its margins. AGU Geophys. Monogr. Ser. / Sutton G.H., Manghnani M.H., Moberly R. (eds). 1976. Vol. 19. P. 319–350.
  26. Jarrard R.D., Clague D.A. Implications of Pacific island and seamount ages for the origin of volcanic chains // Rev. Geophys. Space Phys. 1977. Vol. 15. P. 57–76.
  27. Ito G., Clift P.D. Subsidence and growth of Pacific Cretaceous plateaus // Earth Planet. Sci. Lett. 1988. Vol. 161. P. 85–100.
  28. Klitgord K.D., Schouten H. Plate kinematics of the Central Atlantic // The Geology of North America. The Western North Atlantic region / Vogt P.R., Tucholke B.E. (eds). Geol. Soc. Am. Boulder, Colo, 1986. Vol. M. P. 351–378.
  29. Koppers A.A.P., Morgan J.P., Morgan J.W., Staudigel H. Testing the fixed hypothesis using  $^{40}\text{Ar}/\text{Ar}^{39}\text{K}$  age progressions along seamount trails // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. Vol. 185. P. 237–252.
  30. Larson R.W., Pitman W.C., Golovchenko X., Cande S.C., Dewey J.F., Haxby W.F., La Breeque J.L. The bedrock geology of the World // N. Y.: W.H. Freeman, 1985.
  31. Le Douran S., Parsons B. A note on the correction of ocean floor depths for sediment loading // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87. P. 4715–4722.
  32. Lonsdale P. Paleogene history of the Kula plate: Off-shore evidence and onshore implications // Geol. Soc. Amer. Bull. 1988. Vol. 99. № 5. P. 733–754.
  33. Mammerickx J., Sharman G.F. Tectonic evolution of the North Pacific during the Cretaceous Quiet Period // J. Geophys. Res. 1988. Vol. 93. № B4. P. 3009–3024.
  34. Mc Kenzie D.P. Some remarks on heat flow and gravity anomalies // J. Geophys. Res. 1967. Vol. 72. P. 6261–6273.
  35. Molnar P., Stock J. Relative motions of hotspots in the Pacific, Atlantic and Indian Ocean since late Cretaceous time // Nature. 1987. Vol. 327. P. 587–591.
  36. Morgan W.J. Deep mantle convection plumes and plate motions // Am. Ass. Petrol. Geol. Bull. 1972. Vol. 56. № 1. P. 42–43.

37. *Morgan W.J.* Hotspots tracks and early rifting of the Atlantic // *Tectonophysics*. 1983. Vol. 94. P. 123–139.
38. *Muller R.D., Royer J.Y., Lawer L.A.* Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hotspot tracks // *Geology*. 1993. Vol. 21. № 3. P. 275–278.
39. *Nakanishi M., Sager W.W., Klaus A.* Magnetic lineations within Shatsky Rise, northwest Pacific Ocean: Implications for hot-spot-triple junction interaction and oceanic plateau formation // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. № B4. P. 7539–7556.
40. *Norton I.O.* Plate motions in the North Pacific: the 43 Ma nonevent // *Tectonics*. 1995. Vol. 14. P. 1080–1094.
41. *Parker R.L., Oldenburg D.W.* Thermal model of ocean ridges // *Nature*. 1973. Vol. 242. P. 137–139.
42. *Parsons B., Sclater J.C.* An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. № 5. P. 803–827.
43. *Pilger R.H., Handshumacher D.W.* The fixed hotspot hypothesis and origin of the Easter-Sala and Gomez-Nazca plate // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1981. Vol. 72. № 7. P. 437–446.
44. *Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R.* A new global heat flow compilation // Department of Geol. Sciences. University of Michigan. Ann. Arbor. Michigan. USA. Electronic data base. 1991.
45. *Rea D.K., Basov I.A., Jancek T.R.* Shipboard Scientific Party // *Proc. ODP. Init. Rep.* 1992. Vol. 145. 173 p.
46. *Rea D.K., Dixon J.M.* Late Cretaceous and Paleogene tectonic evolution of the North Pacific Ocean // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1983. Vol. 65. № 1. P. 145–166.
47. *Renkin M.L., Sclater J.G.* Depth and age in the North Pacific // *J. Geophys. Res.* 1988. Vol. 93. № B4. P. 2919–2935.
48. *Rhea K., Northrop J., Von Herzen R.P.* Heat-flow measurements between North America and the Hawaiian islands // *Marine Geol.* 1964. Vol. 1. P. 220–224.
49. *Sclater J.G., Corry C.E.* Heat flow, Hawaiian area // *J. Geophys. Res.* 1967. Vol. 72. № 14. P. 3711–3715.
50. *Sclater J.G., Janpart C., Galson D.* The heat flow through oceanic and continental crust and the heat loss of the Earth // *Rev. Geophys.* 1980. Vol. 18. P. 269–311.
51. *Sclater J.G., Mudie J.D., Harrison C.G.A.* Detailed geophysical studies on the Hawaiian Arch near 24°25'N, 157°40'W: a closely spaced suite of heat-flow stations // *J. Geophys. Res.* 1970. Vol. 75. № 2. P. 333–348.
52. *Stock J., Molnar P.* Uncertainties and implications of the Late Cretaceous and Tertiary position of North America relative to the Farallon, Kula, and the Pacific plates // *Tectonics*. 1988. Vol. 7. № 6. P. 1339–1384.
53. *Tarduno J.A., Cotrell R.D.* Paleomagnetic evidence for motion of the Hawaiian hotspot during formation of the Emperor seamounts // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. Vol. 153. P. 171–180.
54. *Tarduno J.A., Gee J.* Large-scale motion between Pacific and Atlantic hotspots // *Nature*. 1995. Vol. 378. P. 477–480.
55. *Turcotte D.L., Oxburg E.R.* Intra-plate volcanism // *Philos. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A.* 1978. Vol. 288. № 1355. P. 561–579.
56. *Vallier T.L., Dean W.E., Rea D.K., Thiede J.* Geologic evolution of Hess Rise, central North Pacific Ocean // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1983. Vol. 94. P. 1289–1307.
57. *Verzhbitsky E.V.* Geothermal regime and genesis of the Ninety-East and Chagos-Laccadive ridges // *J. Geodynamics*. 2003. Vol. 35. P. 289–302.
58. *Von Herzen R.P., Cordery M.J., Detrick R.S., Fang C.* Heat flow and the thermal origin of hot spot swells: the Hawaiian swell revisited // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94. № B10. P. 13 783–13 799.
59. *Von Herzen R.P., Detrick R.S., Crough S.T. et al.* Thermal origin of the Hawaiian Swell: heat flow evidence and thermal Models // *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. № B8. P. 6711–6723.
60. *White R.S., McKenzie D.* Mantle plumes and flood basalts // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100. № B9. P. 17543–17585.
61. *Wilson J.T.* A possible origin of the Hawaiian islands // *Can. J. Phys.* 1963. Vol. 41. P. 863–870.
62. *Woods M.T., Davies G.F.* Late Cretaceous genesis of the Kula plate // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1982. Vol. 58. P. 161–166.
63. *Yoshii T.* Regionality of group velocities of Rayleigh waves in the Pacific and thickness of the plate // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1975. Vol. 25. P. 305–312.
64. *Zonenshain L.P., Kononov M.V., Savostin L.A.* Pacific and Kula/Eurasia relative motions during the last 130 m.y. and their bearing on orogenesis in Northeast Asia // *AGU Geodyn. Ser.* 1987. Vol. 18. P. 29–48.
65. *Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Kononov M.V.* Absolute reconstructions of the Paleozoic Oceans // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1985. Vol. 74. № 1. P. 103–116.

Рецензенты: А.О. Глико, М.Д. Хуторской



## Evolution of the Lithosphere of the Hawaiian–Emperor Seamount Chain, Pacific Ocean, As Inferred from Geophysical Data

E. V. Verzhbitsky, M. V. Kononov, A. F. Byakov, and V. P. Dulub

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii pr. 36, Moscow, 117997 Russia  
e-mail: verzhbitsky@ocean.ru*

**Abstract**—The analysis of geological and geophysical data on the Hawaiian–Emperor seamount chain indicates that the commonly assumed origin of its lithosphere is inconsistent with the geothermal model of the oceanic-bottom formation. To reveal the nature of the Hawaiian–Emperor Ridge, the main tectonic units of the North Pacific were thoroughly analyzed and a map of geothermal data, magnetic anomalies, and bottom age in this region has been compiled. The subsidence rate of the lithosphere that was thermally rejuvenated by plume material after the passing of the Pacific plate over the Hawaiian hot spot was calculated with the aid of the bathymetric database for the World Ocean. The calculated parameters show that the lithosphere, which underwent thermal rejuvenation, subsides at a much lower rate than it spreads. The obtained empirical equation describes the abrupt uplifting and further subsidence of the oceanic floor during the passing of the Pacific Plate over the Hawaiian plume. The heat flow calculated in line with the thermophysical model of the thermally rejuvenated lithosphere is close to the heat flow measured at the surface of the Hawaiian–Emperor Seamounts. Thus, the proposed model is realistic. Paleogeodynamic reconstructions of the thermal regime during the formation of the Hawaiian–Emperor seamount chain were made in absolute coordinate system for the period 90–20 Ma on the basis of geological and geophysical data and the calculated distribution of bottom ages in the North Pacific.