

УДК 550.361

ПРОЯВЛЕНИЕ АСИММЕТРИИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В МАНТИЙНЫХ ПЛЮМАХ

© 2020 г. М. Д. Хуторской*

Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, Москва, 119017 Россия

*e-mail: mdkh1@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.04.2020 г.

После доработки 11.05.2020 г.

Принята к публикации 01.06.2020 г.

Для всех известных мантийных плюмов характерно расхождение между положением экстремума теплового потока и центром современного вулканизма. Для объяснения этого феномена предложено рассмотреть влияние силы Кориолиса, под действием которой поток магмы в пределах мантийного плюма отклоняется от ортогональной к поверхности планеты траектории. Использована формула, связывающая величину отклонения, широту расположения аномалии теплового потока и глубину очага магматизма. Эволюция тектономагматической активности по-разному проявилась в отдельных плюмах. Развитие Гавайского и Маскаренского плюмов можно объяснить длительной адвекцией магматического вещества из переходного слоя мантии, очаг которого находится вблизи границы Леманн в мантии (400–450 км), а расхождение между положением центра вулканизма и аномалией теплового потока объясняется влиянием силы Кориолиса. В случае Исландского и Йеллоустонского плюмов их эволюция связана не только с тепломассопереносом вещества из переходного мантийного слоя, но и с влиянием магматизма из деплетированной мантии, характерного для дивергентных зон.

Ключевые слова: тепловой поток, мантийный плюм, асимметрия, сила Кориолиса, тепломассоперенос

DOI: 10.31857/S020303062005003X

ВВЕДЕНИЕ

Возможность анализа проявления геотермической асимметрии в большинстве дивергентных зон океанов Земли появилась после создания новой базы планетарного теплового потока, насчитывающей приблизительно 42 тыс. измерений на акваториях [Hasterok, Jennings, 2016]. Заметим, что исследования геотермической асимметрии, проводившиеся в конце XX века [Подгорных, Хуторской, 1999], опирались на базу данных, содержащую около 19 тыс. измерений теплового потока в Мировом океане. Уже первый опыт работ с новой геотермической планетарной базой данных показал, что количество пересечений срединно-океанических хребтов (СОХ), обеспеченных измерениями теплового потока, составляет первые десятки примеров.

Сопоставление геотермических данных для флангов геотраверсов, пересекающих все СОХ в океанах Земли, выявило статистически значимую асимметрию теплового потока, различающуюся по направлению в южном и северном полушариях Земли: в южном полушарии западные фланги геотраверсов характеризуются более высоким

тепловым потоком, а в северном — восточные (рис. 1).

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

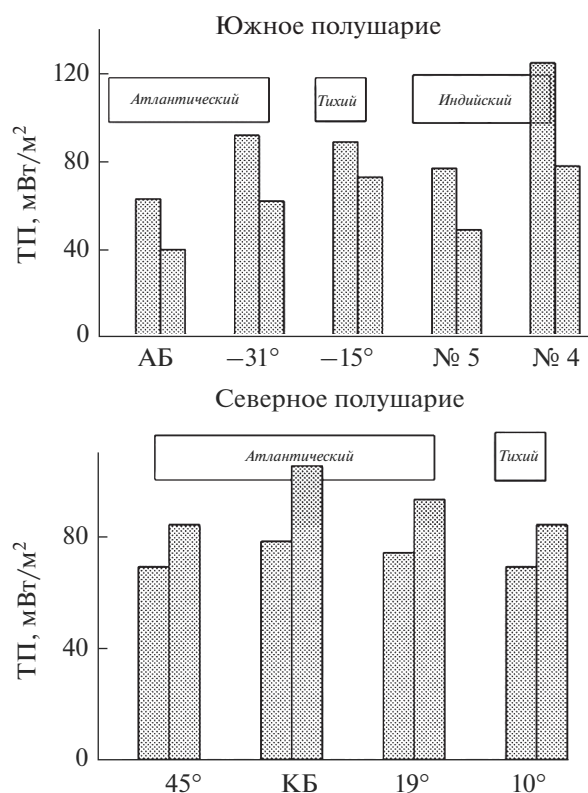


Рис. 1. Гистограммы распределения среднеарифметических значений теплового потока вдоль геотравверсов в Южном и Северном полушариях Земли (на горизонтальной оси указаны названия геотравверсов — их широта или название — АБ — Анголо-Бразильский, КБ — Канаро-Багамский геотравверсы) [Хуторской, Тевелева, 2019a].

Перечисленные факторы, несомненно, требуют учитывать при анализе геотермического поля океанской коры, но они не объясняют разное “направление асимметрии” в северном и южном полушариях [Хуторской, Тевелева, 2019a].

Мы рассматриваем как возможное объяснение данного феномена действие силы Кориолиса, проявляющееся в любом месте на вращающейся планете.

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

В дивергентных зонах такой массой является магма, скопившаяся в астеносферном мантийном резервуаре и перемещающаяся внутри него под действием силы Кориолиса. Избыточная энтропия этой массы обуславливает то специфическое распределение конвективного и кондуктивного теплового потока, которое мы наблюдаем в

дивергентных зонах. Конвективная же разгрузка глубинного тепломассопотока направлена строго вдоль разломной рифтовой зоны и выражается, в конечном итоге, в виде вулканических проявлений на морском дне. В то же время, главным источником кондуктивного теплового потока на флангах СОХ и в смежных абиссальных котловинах является присутствие фракционно расплавленного мантийного материала в астеносферном резервуаре. Концентрация магмы в этом резервуаре асимметрична, что обуславливается влиянием силы Кориолиса. Появление большего количества высоко энтальпийной массы на одном из флангов объясняет наблюдаемую асимметрию кондуктивного теплового потока.

МАНТИЙНЫЕ ПЛЮМЫ

Помимо СОХ, в Мировом океане известны вулканические хребты другого происхождения, которые образуются при движении плит относительно участков мантии, которые принято считать неподвижными, называя их “hot spots” (горячими точками (HS)) или “mantle plumes” (мантийными плюмами (MP)). Первое название не дает представления о причине данного явления, поскольку так можно назвать любой активный вулканический аппарат, вокруг которого глубинные температуры постепенно снижаются. Зато второе — адекватно определяет геодинамическую природу таких точек [Morgan, 1971] и поэтому предпочтительнее. В модели плюма движение плиты над фиксированной или медленно движущейся струей плюма вызывает появление цепи разновозрастных вулканических проявлений и/или топографических (батиметрических) неоднородностей, которые идентифицируют плюмы и дают некоторые выводы об их строении. Эта модель, впервые предложенная Дж. Вилсоном [Wilson, 1963] для Гавайского плюма, была с энтузиазмом воспринята научной общественностью, потому что она давала элегантное объяснение происхождения внутриплитного магматизма и абсолютную систему отсчета, описывающую движение плит относительно глубокой мантии.

Плейт-тектоническая революция испытала сильное сопротивление на ранних этапах своего развития, но она оказалась настолько успешной, что выдержала все критические нападки, и более того, за ней последовала плюм-тектоническая революция, в значительной степени избежавшая критики. Концепция плюмов была предложена для преодоления определенных необъяснимых проблем тектоники плит, таких как существование вулканических цепей и континентальных платобазальтовых провинций. Идея плюмов была принята, хотя и модифицирована, но редко подвергалась сомнению. Альтернативные модели чаще критиковались или игнорировались, чем все-

рьез анализировались. Плюмы стали неоспоримой догмой, а не проверяемой идеей. С их помощью попытались объяснить долгоживущие магматические аномалии, такие как в Исландии, в Йеллоустоне или на Гавайях и еще в 15 других вулканических провинциях, предлагая модели узких, горячих, стационарных плюмов, струй или термиков от границы ядро–мантия. По современным представлениям, в таких точках земное вещество поднимается из слоя D'' вблизи границы нижней мантии с внешним ядром [Tolstikhin, Kramers, 2008], образуя на дне океана цепь вулканических построек, как в Гавайско-Императорском хребте – тектонотипе подобных структур [Morgan, 1971].

Однако некоторые “горячие точки” не развиваются по этому сценарию. Они заметно перемещаются относительно условной начальной позиции, иногда вращаясь, а иногда двигаясь поступательно [Tarduno, Cottrell, 1997], так что изменения в траектории вулканической цепи не соответствуют ожидаемым изменениям движения плиты [Norton, 1995], а некоторые вулканические цепочки не проявляют четкой возрастной привязки [Steinberger, O’Connell, 2000]. Появились высказывания, что, некоторые горячие точки, например, Йеллоустон, не связаны с глубокими мантийными плюмами [Christiansen et al., 2002], и вся модель Дж. Вилсона ставилась под сомнение [Anderson, 2000; Humphreys et al., 2000; Hamilton, 2002].

Одним из аргументов, выдвигаемых критиками ортодоксальной, “гавайской” модели плюмов, был факт асимметрии теплового потока относительно расположения проекции выхода струи плюма на земную поверхность [Anderson, 2000]. Это действительно так – центры вулканизма “горячих точек” и экстремальные значения теплового потока не совпадают на поверхности Земли. Иногда они смещены друг относительно друга на значительные расстояния, 100–200 км. Причины такого смещения для Гавайского и Маскаренского плюмов нами рассматривались раньше [Хуторской, Тевелева, 20196]. Это исследование привело к выводу о влиянии только силы Кориолиса, под действием которой адвективный поток из нижней мантии отклоняется от ортогональной траектории по отношению к поверхности планеты. Но проявления плюм-тектоники не ограничиваются только этими двумя примерами. Рассмотрение феномена “несовпадения локализации активных вулканов и аномалии теплового потока” для районов Исландии и Йеллоустона, которые описаны в данной работе, потребовали специального анализа и моделирования, т.к. полученные здесь геофизические данные, в первую очередь, данные сейсмотомографии, свидетельствуют о более сложном распределении источников мантийного вещества и о суперпозиции вли-

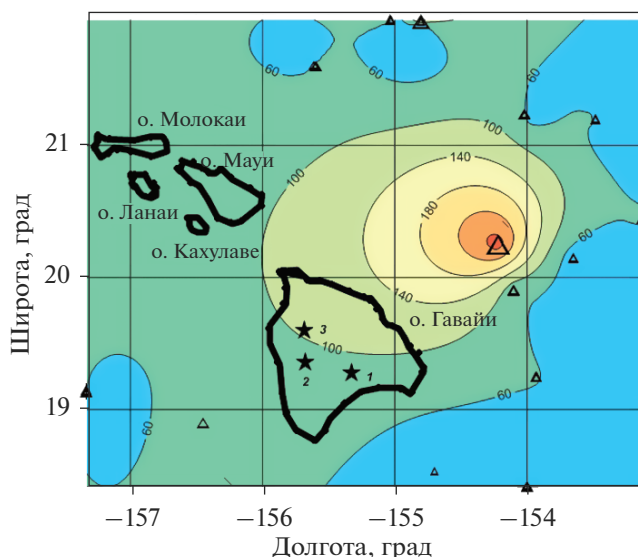


Рис. 2. Карта теплового потока в южной части Гавайского архипелага (изолинии теплового потока, мВт/м^2), (треугольники – пункты измерений, их размер пропорционален величине теплового потока). Звездочками обозначены вулканы о. Гавайи: 1 – Килауэа; 2 – Мауна-Лоа; 3 – Хуалалаи.

яния мантийного потока с различных глубинных уровней.

Анализ истории вулканизма даже в “гавайском тектонотипе” концепции Вилсона–Моргана показывает явные отклонения от ортодоксальной модели. В юго-восточном окончании Гавайско-Императорского хребта (рис. 2) вулканы извергались 5.6–3.8 млн лет назад (о. Кауаи), 3.3–2.2 (о. Оаху), 1.8–1.3 (о. Молокаи), <1–ист. время (о. Мауи), 0.7–н/вр. (о. Гавайи). На южном подводном склоне о. Гавайи находится активный в настоящее время вулканический аппарат Лоихи Симаунт. В целом же ареал современного вулканизма простирается от о. Гавайи далеко на северо-запад. Он включает не только извергавшийся в 1750 г. вулкан Халеакала (о. Мауи), но и подводные вулканы, извергавшиеся в XX веке: на северном склоне о. Оаху (около 1906 г.) и в пунктах с координатами $21^{\circ}39' - 158^{\circ}51'$ и (за пределами рис. 2) $23^{\circ}35' - 163^{\circ}50'$ [Гущенко, 1979].

По мнению О.Г. Сорохтина [Сорохтин и др., 2010], история вулканизма Гавайско-Императорской цепи противоречит ортодоксальной концепции “мантийного плюма”, для которой, собственно, она и была предложена. Так, по геологическим данным установлено, что основная фаза вулканизма, сформировавшая остров Оаху, закончилась около 3 млн лет назад. С тех пор произошла эрозия острова, сформировались поверхности выравнивания и глубокие эрозионные долины, но в течение более чем 2 млн лет никакой вулканической деятельности там больше не про-

исходило. Однако уже в четвертичное время, около нескольких сотен тысяч лет назад, вулканическая активность внезапно вновь проявилась и закончилась лишь 30 тыс. лет назад, сформировав свежие излияния и вулканические постройки гонолульской серии. За 2 млн лет перерыва вулканической деятельности существовавший ранее магматический канал должен был бы полностью раскристаллизоваться и прочно затампонироваться. Но чем тогда можно объяснить новую очень короткую вспышку вулканизма на острове Оаху? Новым “прожиганием” литосферы, над новой “горячей точкой”? Ведь старая “горячая точка” в это же самое время продолжала “действовать” на южном острове архипелага — Гавайи, тогда как о. Оаху за эти 2–3 млн лет переместился к северо-западу от места активного вулканизма приблизительно на 200–300 км. По-видимому, такой короткий импульс повторного вулканизма гонолульской серии (после длительного перерыва вулканической активности) можно объяснить только повторным образованием трещины в литосферной плите под островом Оаху.

ТЕПЛОВОЙ ПОТОК И СИЛА КОРИОЛИСА

На неоднозначность “концепции Вилсона-Моргана” указывает также асимметрия теплового потока (ТП) относительно центра современного активного вулканизма “мантийных плюмов”. Утверждать, что мантийные плюмы совпадают с положительными аномалиями теплового потока было бы неправильно. Как видно из рис. 2, для Гавайского плюма и из остальных рисунков, иллюстрирующих распределение теплового потока, максимумы значений ТП сдвинуты на значительные расстояния относительно положения активных вулканов.

Мы полагаем, что в этом случае также проявляется влияние силы Кориолиса, действующей на поднимающийся из нижней мантии адвективный поток магматических флюидов. За счет этого разгрузка тепломассопотока в виде вулканических проявлений смещена относительно истоков нижнемантийного очага. Но сила Кориолиса не действует на кондуктивный тепловой поток, поэтому его максимум проявляется строго ортогонально относительно глубинного очага. Но если мы ограничимся обсуждением только адвективной струи мантийных термиков, то проявления четвертичного вулканизма на о. Оаху становятся необъяснимой геологической экзотикой. Но стоит лишь допустить наличие конвекции под Гавайями, практически такой же, как под срединными хребтами, и становится понятной природа дополнительных вспышек вулканической активности. Причем, нам не надо искать сверх перегретых мантийных слоев при конвективном перемешивании. Известно, что в условиях конвекции

формируется адиабатическое распределение температур в конвективной струе с абсолютными значениями температур, совпадающими с солитусом мантийного вещества при соответствующих PT -условиях, т.е. 1250–1300°C при средней глубине астеносферного слоя в океанах. Распространенный на обширном пространстве, захваченном конвекцией, магматический расплав может прорваться на поверхность через любую ослабленную или трещиноватую зону, что, очевидно, и произошло на о. Оаху.

Похожую картину мы наблюдаем в Маскаренской цепи вулканов Индийского океана (вулканы Питон-де-Неж на о. Реюньон и вулкан Питон на о. Маврикий). Здесь центр современного вулканизма (о. Реюньон) отстоит на 320 км к юго-востоку от аномалии теплового потока. И такое смещение со скоростью v также объясняется влиянием силы Кориолиса. Тем более, что сила Кориолиса (F_k), действующая на любую материальную точку Земли (m) из-за ее вращения против часовой стрелки (относительно северного полюса) с угловой скоростью (ω), зависит от географической широты (φ):

$$F_k = 2mv\omega \sin \varphi$$

и имеет противоположное направление в северном и южном полушариях. Этим можно объяснить юго-западное смещение центра вулканизма в Гавайях и юго-восточное — в Реюньоне.

Отклонение проекции траектории глубинного тепломассопотока (D) на земную поверхность зависит от глубины очага плюма (H) и широты местности φ . Эту зависимость можно описать формулой:

$$D = 0.022H^{3/2} \cos \varphi \quad (1)$$

[Куликов, 1985]. Из этой зависимости ясно, что нулевое отклонение положения аномалии теплового потока и центра вулканизма плюма возможно только на полюсах, а максимальное отклонение конвективного тепломассопотока будет наблюдаться на экваторе.

Эта зависимость после несложных тождественных преобразований дает возможность рассчитывать глубину магматического очага плюма, если известна величина D .

Рассмотрим пример для Гавайского мантийного плюма. Он лежит на широте 19.5° N; $\cos \varphi = 0.94$; $D = 178$ км. Отсюда следует, что $H = \sim 420$ км.

Таким образом, поток магмы, поднимаясь к поверхности Земли с глубины 420 км, отклонится под действием силы Кориолиса на 1.6° по долготу, что составляет 178 км. Традиционно, глубина 400–450 км ассоциируется с границей Леманн, которая разделяет астеносферу на два слоя с различной вязкостью. Выше этой границы вязкость равна 10^{19} Па с, а ниже — 10^{20} Па с. При этом вся

астеносфера в целом остается ослабленным слоем мантии, так как характеризуется значительно меньшей вязкостью, чем подстилающая ее нижняя мантия (10^{23} – 10^{24} Па с) и, разумеется, чем перекрывающая ее литосфера (более 10^{28} Па с) [Ап-лонов, 2001]. Из этого следует, что наиболее вероятной глубиной, где формируется магматический материал плюма, является глубина границы Леманн. Наша оценка глубины магматического очага, исходя из предположения о природе отклонения аномалии теплового потока и центра вулканизма, вызванного силой Кориолиса, оказалась почти идеально совпадающей с глубиной этой границы. Но дополнительный и не меньший очаг вулканизма можно объяснить фракционным плавлением вещества в астеносфере и проявлением вулканизма, не связанного напрямую с мантийным плюмом.

Рассмотрим пример для Маскаренского плюма. За центр вулканизма примем положение вулкана Питон-де-Неж на о. Реюньон. Тогда $D = 3^\circ$ по широте, или 330 км (рис. 3). Широта $\varphi = -18^\circ$, а $\cos \varphi = 0.66$. Из формулы (1) следует, что здесь глубина очага вулканизма составляет 802 км. Это та глубина, где происходит переход от средней к нижней мантии. Несмотря на то, что температуры на этой глубине оцениваются величиной 2300–2500°C [Jaupart et al., 2007], вещество здесь не изменяет свое фазовое состояние с твердого на жидкое, судя по скоростям сейсмических волн, из-за преобладающего роста градиента давления по сравнению с градиентом температуры. Следовательно, в этом интервале глубин мантии поток поднимающегося плюма не может ассоциироваться с массопотоком фракционно расплавленного вещества, а представляет собой, по-видимому, диффузный поток отдельных молекул относительно легких минералов, который по скорости распространения соизмерим со скоростью кондуктивной теплопередачи, т.е., примерно 5×10^{-12} м/с. Однако, мощность предполагаемого диффузного потока такова, что она не обеспечит островной вулканизм в пределах Маскаренского плюма. Значит, мы опять приходим к логическому выводу, что наряду с глубинным диффузным потоком существует конвективный тепломассоперенос на глубинном уровне, соизмеримом с глубиной астеносферы, который вполне может обеспечить вулканизм.

Анализ природы асимметрии теплового потока в Исландии и в Йеллоустоне ставит еще дополнительные вопросы, которые давно обсуждаются, но не получили пока убедительного объяснения [White, McKenzie, 1995; Foulger, 2002; Shen et al., 1998].

При интерпретации геодинамики Исландского плюма роль геотермии и анализ распределения теплового потока, как ни странно, оказались вто-

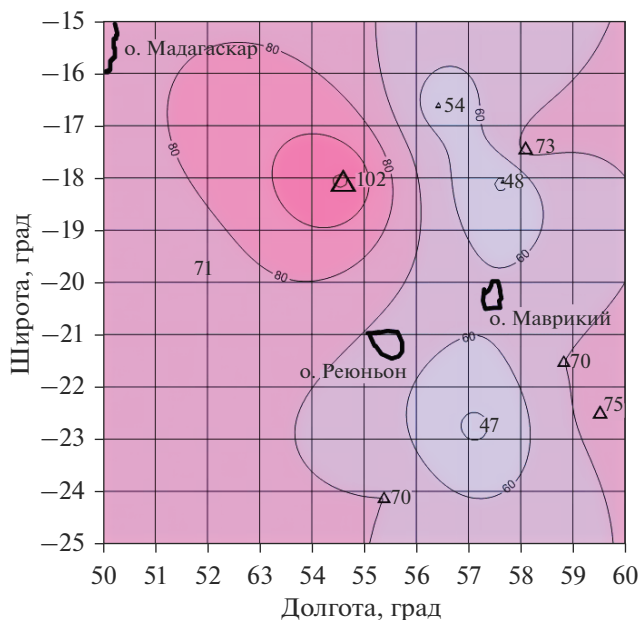


Рис. 3. Карта теплового потока района Маскаренских островов (изолинии, мВт/м²). Треугольники – пункты измерений теплового потока и его величина.

ростепенными. Это можно объяснить двумя причинами. Во-первых, прогноз теплового потока сложно было составить из-за суперпозиции влияния мантийного плюма и спрединга Срединно-Атлантического хребта [Ito, van Keken, 1997]. Исландская модель представлялась сложнее, чем модель плюма в центре океанической плиты (гавайская или маскаренская). Во-вторых, измерения теплового потока на дне океана по обе стороны от срединного хребта, а также в скважинах на территории Исландии продемонстрировали низкий тепловой поток, намного ниже, чем он должен был быть для литосферы с возрастом 40 млн лет и моложе. Отчасти, это объясняется влиянием конвективного тепломассопереноса, который снижает фоновую кондуктивную компоненту потока тепла [Stein, Stein, 1992]. Следовательно, было неясно, как охарактеризовать “нормальный” фоновый тепловой поток, который априорно для плюмовых моделей должен быть намного выше наблюдаемого из-за миграции материала плюма. В данном случае миграция может осуществляться как вертикально из подлитосферной недеплетированной мантии, так и горизонтально, вместе с океанической плитой [White, McKenzie, 1995]. Это должно поднять температуру в литосфере и, соответственно, тепловой поток, но положение аномалии теплового потока будет определяться тем, “какая из миграций плюма сильнее”.

На рис. 4 показана карта теплового потока этого региона. Как видно из этого рисунка, максимумы теплового потока находятся как на простира-

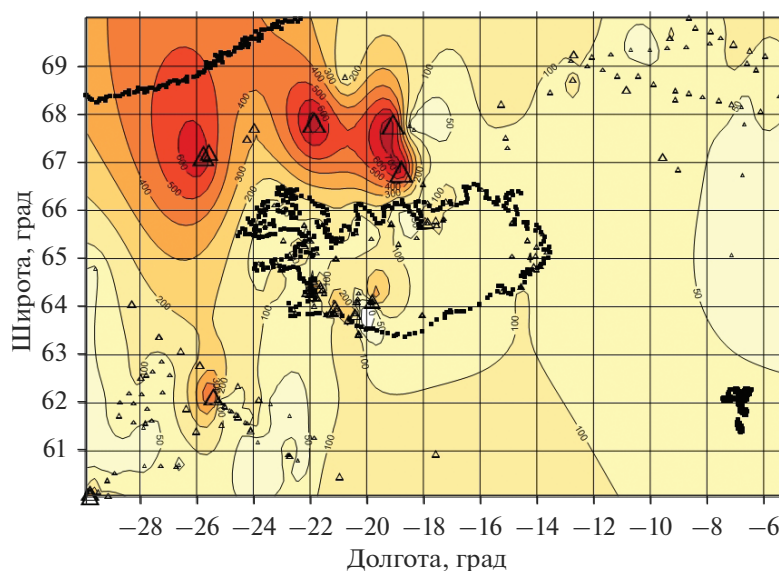


Рис. 4. Карта теплового потока (мВт/м^2) Исландии и смежных акваторий. Треугольники — пункты измерений теплового потока. Их размер пропорционален величине теплового потока.

нии хребта Колбейнсей, так и северо-западнее Исландии в Датском проливе, т.е. на Северо-Американской плите.

Если обратиться к той реконструкции движения Северо-Американской плиты над горячей точкой Исландии, которая обсуждается в работе [Lawver, Müller, 1994] (рис. 5), то мы видим, что максимальные значения теплового потока формируются из-за адвекции магматического материала в условиях дивергенции Срединно-Атлантического хребта и влияния мантийного плюма, максимальное воздействие которого приурочено к положению плиты для времени $\tau = 30$ Ма.

Именно в это время нынешний район Датского пролива находился над плюмом. Почему же аномалия теплового потока совпала с положением плиты, которое было 30 млн лет назад? Мы можем рассчитать глубину (H) магматической камеры при допущении, что от нее до поверхности Земли тепловой поток распространялся только кондуктивно.

$$H = 2(a\tau)^{1/2},$$

где a — коэффициент температуропроводности, который для океанской литосферы составляет $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. В этом случае, $H = 60$ км, т.е. тепло распространялось с кровли астеносферы, которая в Исландско-Гренландском пороге по данным [Torsvik et al., 2015] располагается именно на этой глубине.

Таким образом, тепловой источник связан с выступом астеносферы, который образовался за счет поступления тепла в астеносферный слой из нижележащей мантии. Налицо суперпозиция двух геодинамических источников, формирую-

щих аномалии теплового потока: тепломассоперенос вещества из недеплетированной мантии, который привел к увеличению энтальпии астеносферного резервуара, и кондуктивный перенос тепла из этой активизированной астеносферы.

Интерпретация геофизических и геологических данных в Йеллоустоне однозначно свидетельствует о том, что эта горячая точка возникла в результате взаимодействия мантийного плюма с перекрывающей плитой Северной Америки. Этот процесс вызвал сильные изменения структуры континентальной литосферы в результате магматических и тектонических процессов и сформировал линейament Йеллоустун—Снейк-Ривер (YSRP) длиной 700 км (рис. 6), в котором последние 16–17 млн лет продуцируются кислые вулканические породы [Smith et al., 2009].

По данным сейсмической томографии [Husen et al., 2004], резервуар коровой магмы содержит от 8 до 15% расплава на глубине от 6 до 16 км под кальдерой Йеллоустона. Магматическое тело с пониженной скоростью Р-волн в верхней мантии простирается субвертикально на глубинах от 80 до 250 км ниже Йеллоустона, но еще ниже по томографическим данным находится аномальное тело, наклоненное на 60° в ЗСЗ направлении и простирающееся до глубины 660 км в переходной зоне мантии. Это трубчатое низкоскоростное тело интерпретируется как плюм с дефицитом скоростей до -3.5% v_p и -5.5% v_s , что соответствует частичному расплавлению 1–2% вещества [Smith et al., 2009]. Геодинамическая модель плюма Йеллоустона с такими параметрами сейсмических скоростей предполагает относительно небольшое превышение температуры

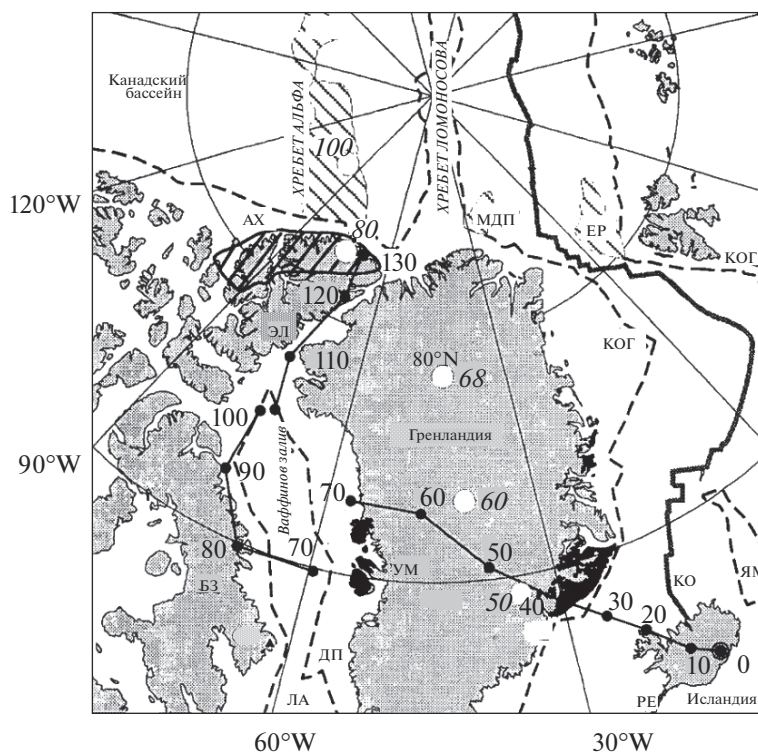


Рис. 5. Трек Северо-Американской плиты в районе Гренландии над Исландской “горячей точкой” за время от 130 до 0 Ма. Большие черные точки — палеопозиция плиты для каждых 10 млн лет; АХ — о. Аксел Хелберг; БЗ — Баффинова Земля; ДП — Дэвисов пролив; ЭЛ — о. Элсмир; ЯМ — Ян-Майен; КА — лавовое плато Кангерлусак, Вост. Гренландия; КО — хребет Колбейнсей; ЛА — Лабрадорское море; МДП — Плато Моррис-Джессоп; МЕ — хребет Менделеева; РЕ — хребет Рейкьянес; УМ — лавовое плато Уманак-фьорда, Зап. Гренландия; ЕР — плато Ермак; КОГ — граница континентальной и океанической коры по данным батиметрии.

Белые кружки показывают положение плюма по [Forsyth et al., 1986].

(до 120°C) по сравнению с окружающим пространством, что обеспечивается расплавлением 2.5% вещества. По результатам моделирования мантийной конвекции в Йеллоустон–Снейк-Ривер установлено, что восходящая ветвь конвективной ячейки поднимается со скоростью 5 см/год и обеспечивает отклонение восходящего плюма Йеллоустона к востоку [Jordan et al., 2005], то есть навстречу движению Северо-Американской плиты (рис. 7).

Тот же феномен — отклонения потока плюма — можно объяснить и влиянием кориолисовой силы. Ее действие, так же, как и в других мантийных плюмах, отражается в смещении максимальных значений теплового потока относительно центра современного вулканизма.

Тепловой поток здесь измерен более, чем в 200 скважинах [Blackwell, 1989; Blackwell et al., 2006]. Диапазон изменения теплового потока охватывает два порядка величины. В районе линеамента Ньюберри и на южной окраине Плато Колумбия его значения не превышают 80 мВт/м^2 . Но зато в районе “тектонической параболы” и линеамента

Снейк-Ривер встречаются значения теплового потока, превышающие 4 Вт/м^2 .

“Рекордно” высокий тепловой поток (4.183 Вт/м^2) измерен в точке с координатами 44.7° с.ш. — 110.7° з.д., т.е. северо-западнее кальдеры Йеллоустон (рис. 8). Но по простирацию линеамента Снейк-Ривер, северо-восточнее кальдеры тепловой поток снижается почти на порядок, составляя от 200 до 600 мВт/м^2 . Объяснение этого факта для Йеллоустона аналогично тому, который мы предложили для Исландского плюма, т.е., первая причина — влияние динамики подземных вод, экранирующей кондуктивный тепловой поток, и вторая — низкая температуропроводность, из-за чего тепловой фронт, сформированный у глубинного источника, не достиг еще поверхности Земли.

Положение “глубинного источника”, формирующего тепловой поток можно рассчитать по формуле (1). Здесь величина отклонения положения аномалии теплового потока от центра кальдеры составляет $D = 28 \text{ км}$. Кальдера находится на широте $\varphi = 44.4^{\circ}$ с.ш., следовательно, $\cos\varphi = 0.714$. Отсюда, глубина источника тепла составляет 144 км.

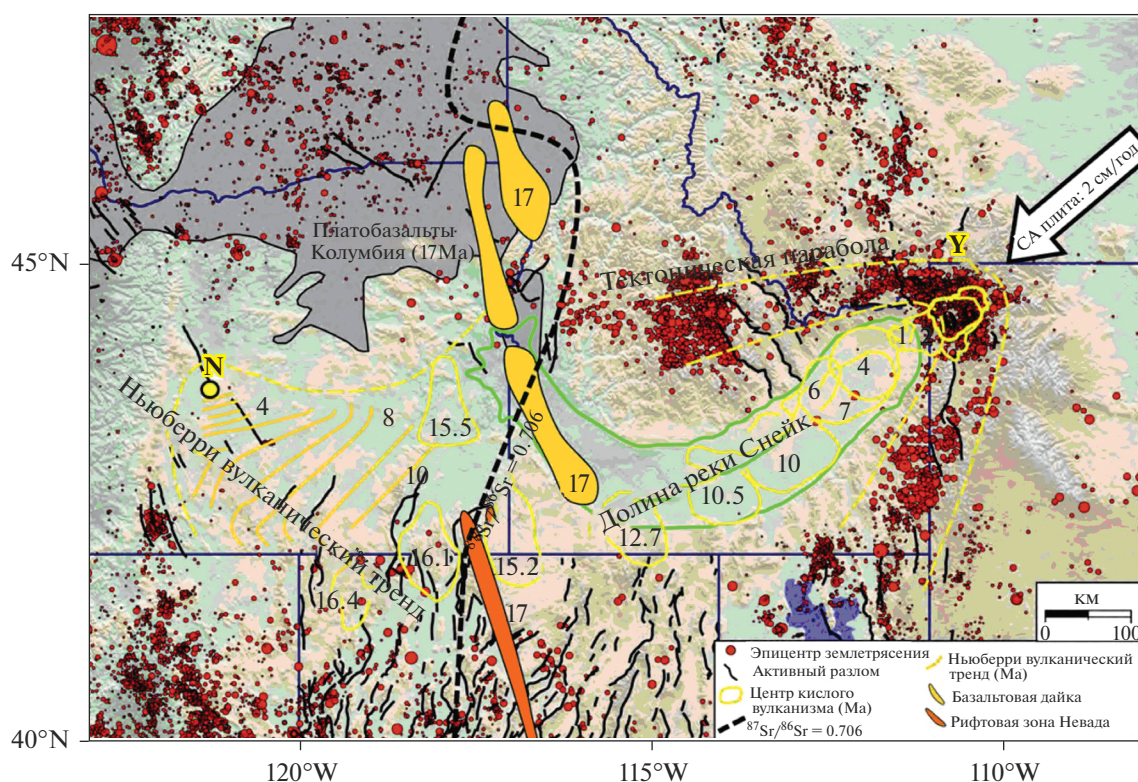


Рис. 6. Траектория горячей точки Йеллоустона (желтый “Y”) [Smith, Siegel, 2000], контролируемая движением на восток трансгрессивных по возрасту вулканических центров линеймента Снейк-Ривер; встречное движение на запад Северо-Американской плиты со скоростью 2 см/год. Топографическое понижение, занимаемое долиной реки Снейк, выделено зеленым цветом. Центры кислого вулканизма моложе 17 млн лет (желтые линии) включают многочисленные кальдерообразующие извержения. Платобазальты Колумбия закрашены серым цветом. Красные точки — эпицентры исторических землетрясений M 1.5–7.5 из каталога землетрясений университета Юты. Черные линии — четвертичные разломы. Кайнозойские базальтовые дайки (возраст в Ма) показаны желтым и оранжевым. Граница $Sr^{87}/Sr^{86} = 0.706$ (черная пунктирная линия) интерпретируется как граница континентальной литосферы (восточнее) и океанической (западнее). “Тектоническая парабола” (желтый пунктир) оконтуривает область высокого рельефа и сейсмичности. N — кальдера Ньюберри — западная граница зоны кислого вулканизма.

Оценка мощности литосферы под Йеллоустоном по сейсмическим данным дала значение 140 км [Waite et al., 2005], что практически идеально совпадает с результатом нашего расчета. Следовательно, главным источником кондуктивного теплового потока для Йеллоустонского плюма, так же, как и для Исландского, является граница литосфера—астеносфера, где за счет экзотермического эффекта фазового перехода мантийного вещества генерируется энергия, проявляющаяся на поверхности Земли в виде кондуктивного теплового потока, а причиной асимметрии центра вулканизма и аномалии теплового потока является сила Кориолиса, т.к. формула (1) [Куликов, 1985] основана на физическом принципе воздействия этой силы.

Для определения глубины очага магмы в мантийных плюмах с помощью формулы (1) удобно рассчитать трехмерную диаграмму, связывающую величину отклонения экстремума теплового

потока от центра вулканизма, его широту и глубину очага (рис. 9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вслед за установленной асимметрией теплового потока в дивергентных зонах, причиной которой является перераспределение магматического материала в астеносферном резервуаре под влиянием силы Кориолиса, мы показали, что подобная асимметрия сопровождается распределением теплового потока и в мантийных плюмах: экстремальные значения теплового потока смещены относительно положения центра современного вулканизма. Связать этот феномен с влиянием силы Кориолиса можно только в отдельных проявлениях “горячих точек”. Например, в Гавайской и Маскаренской цепи вулканов. В других нами рассмотренных плюмах (Исландия, Йеллоустон), кроме силы Кориолиса на поднимающийся магматический материал с различных глубинных мантийных уровней действуют дополнительные

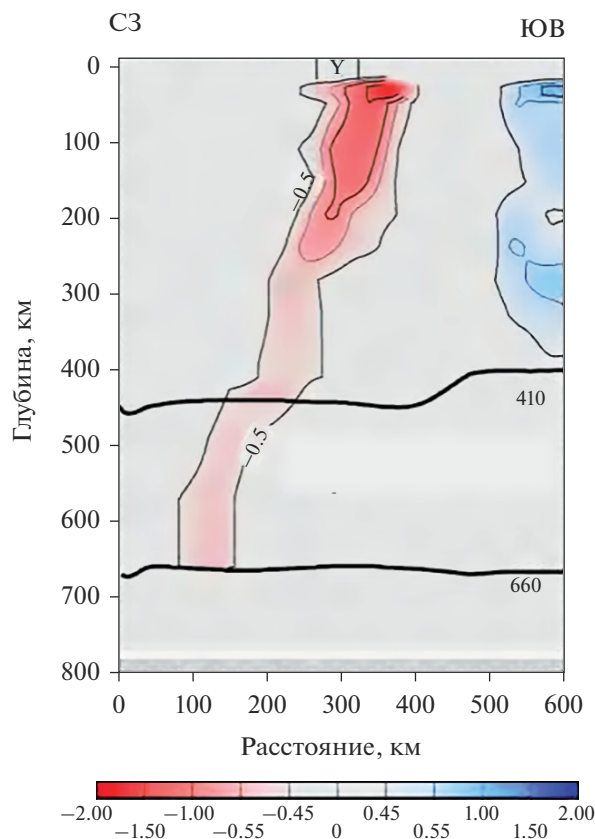


Рис. 7. Двухмерная модель мантийного Йеллоустонского плюма [Jordan et al., 2005] по сейсмотомографическим данным. Изолинии и цветовая шкала показывают степень пертурбации (%) скорости продольной волны. Положение кальдеры Йеллоустона обозначено как “Y”.

силы, существующие в областях дивергенции плит. В этих случаях асимметрия теплового потока сохраняется, но ее ориентация не подчиняется физическим принципам воздействия только кориолисовой силы.

В этой статье мы еще раз хотели бы обратить внимание исследователей на важность оценки не только структурно-геологических факторов, обуславливающих асимметрию геофизических полей в областях активного современного вулканизма “горячих точек”, но и на влияние планетарных факторов, действующих на всех широтах планеты, но изменяющих знак асимметрии в зависимости от нахождения этих областей в разных полушариях Земли.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-00014).

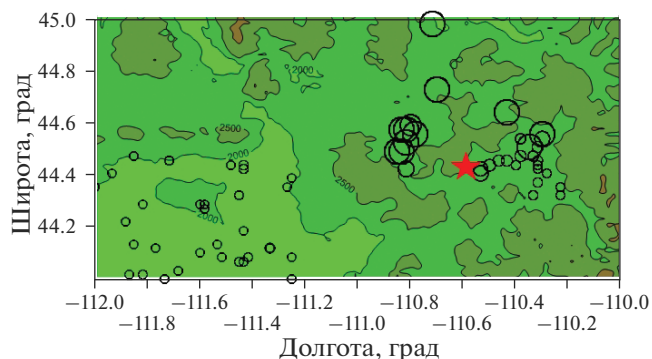


Рис. 8. Карта рельефа и теплового потока (мВт/м^2) в районе кальдеры Йеллоустон. Красная звездочка — положение кальдеры вулкана Йеллоустон. Размер кружков, показывающих локализацию измерений теплового потока, пропорционален его значению ($\text{min} = 25 \text{ мВт/м}^2$, $\text{max} \approx 4200 \text{ мВт/м}^2$).

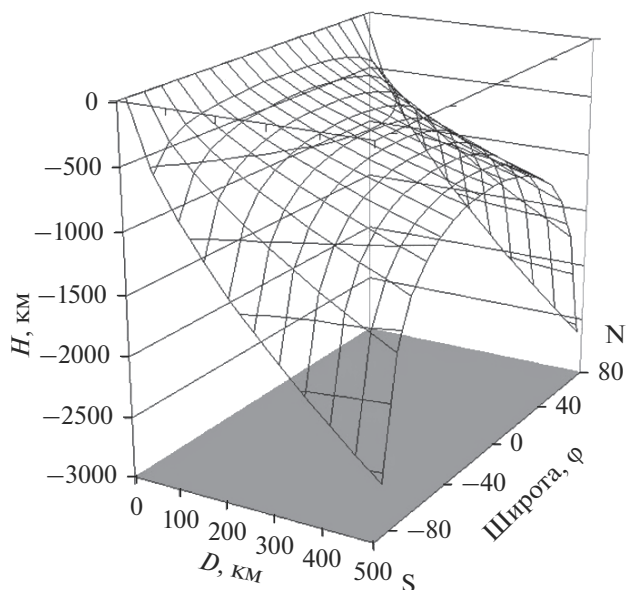


Рис. 9. Диаграмма связи глубины магматического очага, расстояния от центра вулканизма до экстремума теплового потока и географической широты экстремума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аглонов С.В. Геодинамика. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 352 с.
- Гущенко И.И. Извержения вулканов мира (каталог). М.: Наука, 1979. 475 с.
- Куликов К.А. Вращение Земли. М.: Недра, 1985. 159 с.
- Подгорных Л.В., Хуторской М.Д. Геотермическая асимметрия срединных хребтов Мирового океана // Геотектоника. 1999. № 3. С. 21–42.

- Сорохтин О.Г., Чилингар Дж.В., Сорохтин Н.О. Теория развития Земли: происхождение, эволюция и трагическое будущее. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований РАН, РАЕН, 2010. 751 с.
- Хуторской М.Д., Тевелева Е.А. Асимметричное распределение теплового потока на срединно-океанических хребтах Мирового океана // Докл. АН. 2019а. Т. 489. № 2. С. 71–77.
- Хуторской М.Д., Тевелева Е.А. Об асимметрии теплового потока в мантийных плюмах // Мониторинг. Наука и технологии. 2019б. № 4(42). С. 72–77.
- Anderson D. The thermal state of the upper mantle: no role for mantle plumes // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 3623–3626.
- Blackwell D.D. Regional implications of heat flow of the Snake River Plain, northwestern United States // *Tectonophysics*. 1989. V. 164. P. 323–343.
- Blackwell D.D., Negraru P.T., Richards M.C. Assessment of the enhanced geothermal system resource base of the United States // *Nat. Resources Results*. 2006. V. 15(4). P. 283–308.
- Christiansen R., Foulger G., Evans J. Upper-mantle origin of the Yellowstone hotspot // *Geol. Soc. Am. Bull.* 2002. V. 114. P. 1245–1256.
- Forsyth D.A., Morel-l'Huissier P., Asudsen I. et al. Alpha Ridge and Iceland: Product of the same plume? // *J. Geodynamics*. 1986. V. 6. P. 197–214.
- Foulger G.R. Plumes, or plate tectonic processes? // *Astron. Geophys.* 2002. V. 43. P. 619–623.
- Hamilton W. The closed upper-mantle circulation of plate tectonics in Plate Boundary Zones / Ed. S. Stein, J. Freymueller. Washington DC: AGU, 2002. P. 359–410.
- Hasterok D., Jennings S. Global database: <http://heat-flow.org>, 2016.
- Humphreys E.D., Dueker K.G., Schutt D.L. et al. Beneath Yellowstone: Evaluating plume and nonplume models using teleseismic images of the upper mantle // *GSA Today*. 2000. V. 10. № 12. P. 1–7.
- Husen S., Smith R.B., Waite G.P. Evidence for gas and magmatic sources beneath the Yellowstone volcanic field from seismic tomographic imaging // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2004. V. 131. P. 397–410.
- Ito G., van Keken P.E. Hotspots and melting anomalies / Ed. D. Bercovici. *Mantle Dynamics, Treatise on Geophysics*. V. 7. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Press, 1997. P. 512–526.
- Jaupart C., Labrosse S., Mareschal J.C. Temperatures, Heat and Energy in the Mantle of the Earth / Ed. Editor-in-Chief S. Gerald. *Treatise on Geophysics*. 2007. Amsterdam: Elsevier, P. 253–303.
- Jordan M., Smith R.B., Puskas C., Farrell J., Waite G. The Yellowstone hotspot and related plume: volcano-tectonics, tomography, kinematics and mantle flow // *EOS Trans. AGU*. 2005. V. 86(52). P. 1380–1388.
- Lawver L.A., Müller R.D. Iceland hotspot track // *Geology*. 1994. V. 22. P. 311–314.
- Morgan W.J. Convection plumes in the lower mantle // *Nature*. 1971. V. 230. P. 42–43.
- Norton I. The 43Ma nonevent // *Tectonics*. 1995. V. 14. P. 1080–1094.
- Shen Y., Solomon S.C., Bjarnason I.Th., Wolfe C.J. Seismic evidence for a lower mantle origin of the Iceland plume // *Nature*. 1998. V. 395. P. 62–65.
- Smith R.B., Jordan M., Steinberger B. et al. Geodynamics of the Yellowstone hotspot and mantle plume: seismic and GPS imaging, kinematics, and mantle flow // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2009. V. 188. P. 26–56.
- Smith R.B., Siegel L. Windows into the Earth's interior; The geologic story of Yellowstone and Grand Teton National Parks. Oxford: University Press, 2000. 256 p.
- Stein C.A., Stein S. A model for the global variation in oceanic depth and heat flow with lithospheric age // *Nature*. 1992. V. 359. P. 123–129.
- Steinberger B., O'Connell R.J. Effects of mantle flow on hotspot motion // *Geophys. Mono.* 2000. V. 121. P. 377–398.
- Tarduno J., Cottrell R. Paleomagnetic evidence for motion of the Hawaiian Hotspot during formation of the Emperor Seamounts // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. V. 153(3–4). P. 171–180.
- Tolstikhin I.N., Kramers J. The Evolution of Matter from the Big Bang to the Present Day. Cambridge: University Press, 2008. 521 p.
- Torsvik T.H., Amundsen H.E.F., Tronnes R.G. et al. Continental crust beneath southeast Iceland // *Proceed. of National Acad. Sci. of USA (PNAS)*. 2015. № 3. P. 1818–1827.
- Waite G.P., Schutt D.L., Smith R.B. Models of lithosphere and asthenosphere anisotropic structure of the Yellowstone hot spot from shear wave splitting // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. B1.1304.
- White R.S., McKenzie D.P. Mantle plumes and flood basalts // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 17543–17585.
- Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian Islands // *Can. J. Phys.* 1963. V. 41. P. 863–870.

Heat Flow Asymmetry Manifestations in Mantle Plumes

M. D. Khutorskoi*

Geological Institute RAS, Pyzhevsky lane, 7, Moscow, 119017 Russia

**e-mail: mdkh1@yandex.ru*

All known mantle plumes are characterized by a divergence between the extreme heat flow position and the recent volcanism center. This phenomenon explains, it is proposed to consider the Coriolis force influence, under the influence of which the magma flow within the mantle plume deviates from the orthogonal to the

planet surface trajectory. A formula was used that relates the deviation, the latitude of heat flow anomaly location and the magmatism focus depth. The evolution of tectonomagmatic activity manifested itself differently in individual plumes. The Hawaiian and Mascarene plumes development can be explained by the prolonged magmatic matter advection from the mantle transition layer, the focus of which is near the Lehmann boundary in the mantle (400–450 km), and the discrepancy between the center of volcanism position and heat flow anomaly is explained by the Coriolis force influence. In the Icelandic and Yellowstone plumes, their evolution is associated not only with the heat and mass transfer of matter from the transition mantle layer, but also with the magmatism influence from the depleted mantle, characteristic of divergent zones.

Keywords: heat flow, mantle plume, asymmetry, Coriolis force, heat-mass transfer