



УДК 551.46

Б. В. Баранов, К. А. Дозорова, О. Н. Чайкина

*Институт океанологии им. П. П. Shirshova РАН,
Москва, 117977; e-mail: bbaranov@ocean.ru*

Аномалии теплового потока и геодинамика Командорской котловины

В настоящей работе для объяснения возникновения области высокого теплового потока в западной части Командорской котловины предложена модель, основанная на особенностях кинематики плит, взаимодействующих в этом регионе, и геометрии астеносферных течений под сочленением Камчатки и Алеутской дуги. Модель предполагает наличие двух осей современного растяжения, приуроченных к массиву Вулканологов и возвышенности Бета и ориентированных в северо-восточном и северо-западном направлениях, соответственно. Высокий тепловой поток в западной части котловины объясняется выплавлением магмы из астеносферного течения в условиях растяжения, обусловленного левосторонними сдвиговыми смещениями вдоль границы литосферных плит.

Введение

Командорская котловина расположена в тылу Командорского сегмента Алеутской островной дуги и ограничена с северо-запада побережьем Камчатки и Корьякии и с востока хребтом Ширшова. В результате исследований, интенсивно проводимых здесь до начала 90-х годов прошлого столетия, были получены данные о рельефе, строении осадочного чехла, фундамента и геофизических полях. В том числе были выделены две области высокого теплового потока, расположенные в южной и западной частях Командорской котловины. Если происхождение первой из них связывается с тектономагматической активностью, приуроченной к оси современного растяжения, то природа второй области до настоящего времени является предметом дискуссий.

В настоящей работе наличие области высокого теплового потока в западной части Командорской котловины будет рассмотрено в рамках модели, сочетающей в себе кинематику плит, взаимодействующих в этом регионе и наличие астеносферных течений под сочленением Камчатки и Алеутской дуги. С этой целью будет дана общая характеристика основных структурных элементов Командорской котловины и её теплового потока с использованием обобщающих работ, посвящённых этим вопросам [4–7], а также приведено описание моделей, предложенных ранее для объяснения природы высокого теплового потока в западной части котловины.

Рельеф и строение фундамента Командорской котловины

Большая часть дна Командорской котловины представлена аккумулятивной равниной, поверхность которой в некоторых местах нарушена поднятиями и прогибами. К таким структурам относятся массив Вулканологов с центральным вулканом Пийпа

и сопряженный с ними грабен Командор (рис. 1). Минимальная отметка глубин наиболее высокой вершины вулкана составляет 345 м, она возвышается над поверхностью аккумулятивных равнин прилегающих участков Командорской котловины более чем на 3500 м.

В юго-восточном направлении от массива Вулканологов в рельефе дна прослеживается Южно-Командорское поднятие, ориентированное параллельно склону Командорского блока Алеутского хребта. Куполообразные вершины этого поднятия ориентированы в северо-восточном — субмеридиональном направлениях; их высота относительно прилегающих аккумулятивных равнин достигает 350 м.

Следующие две структуры, которые выделяются в рельефе дна Командорской котловины — это хребет Альфа и поднятие Бета. Хребет Альфа ограничивает грабен Командор с севера и в рельефе котловины отчётливо виден вплоть до её западного борта. Поднятие Бета расположено в западной части Командорской котловины к северу от западного участка хребта Альфа и оконтуривается изобатой 3200–3300 м. Поднятие примыкает к восточному склону Камчатки, прослеживаясь от него в юго-восточном направлении на расстояние около 180 км.

В строении фундамента Командорской котловины наиболее примечательными являются зоны разломов Беринга, Альфа, Гамма и Дельта, пересекающие её с востока на запад (рис. 2). Первая из них — зона разломов Беринга проходит по подножью блока Командорских островов, отделяя его от фундамента котловины. Зона разломов Беринга является сейсмически активной. Зона разлома Альфа параллельна зоне разломов Беринга и расположена севернее на расстоянии 70–80 км. Она проявляется в рельефе и структуре фундамента как линейное поднятие или уступ. Зоны разломов Гамма и Дельта, ориен-

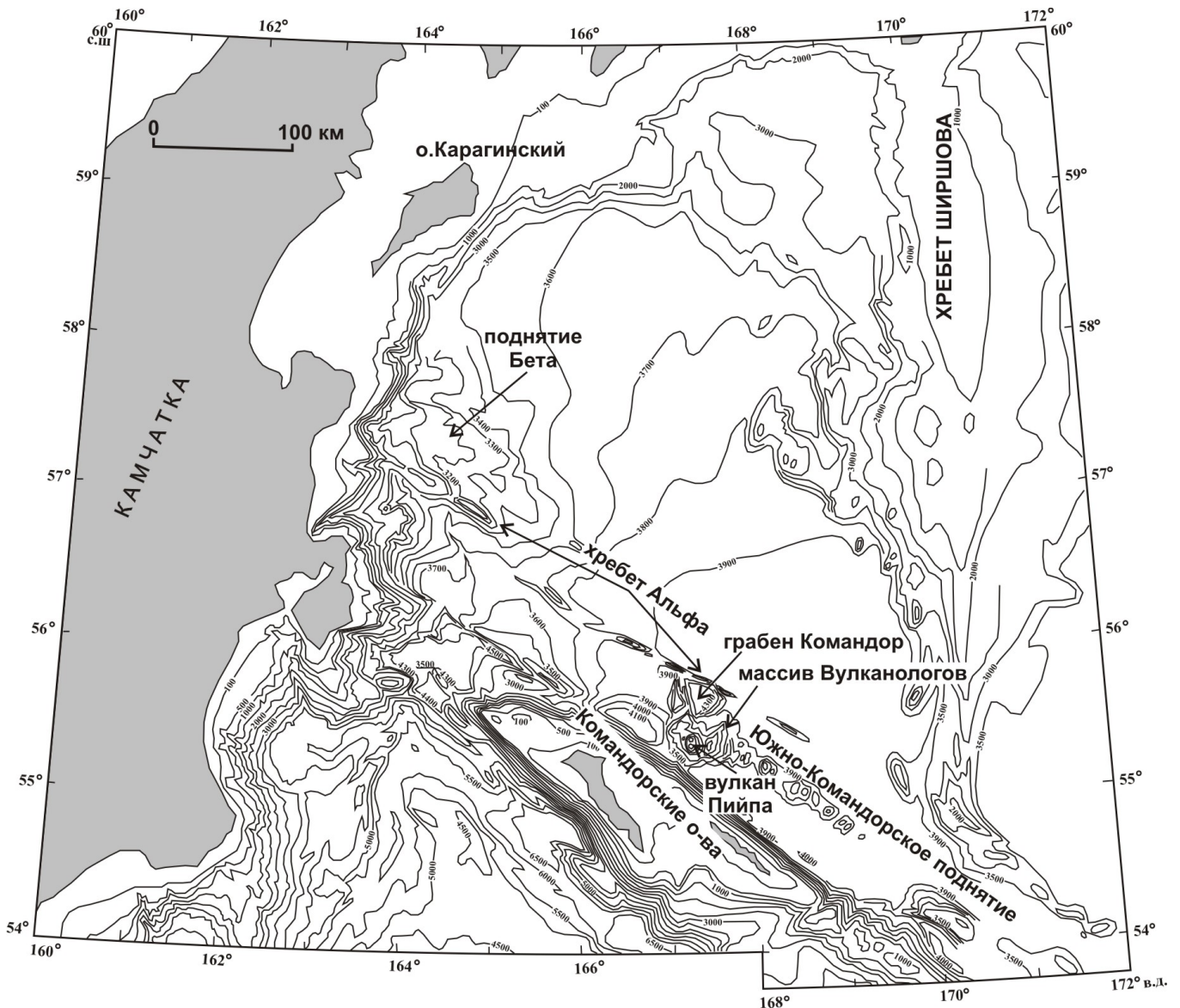


Рис. 1. Рельеф Командорской котловины по [4]. Изобаты проведены через 500 м, дополнительные изобаты — через 100 м.

тированы субпараллельно зоне разломов Альфа и удалены от неё на расстояние около 150 и 270 км, соответственно. Зона разломов Гамма отдельными фрагментами проявляется в рельефе и фундаменте от склона Восточной Камчатки у южной части о. Карагинский до подножья хребта Ширшова. Зона разломов Дельта в структуре котловины и её фундаменте выражена слабо, но на её простирации происходит смещение структур хребта Ширшова. Совокупность полученных данных по строению зон разломов даёт основание полагать, что все они являются сдвигами, образовавшимися при раскрытии Командорской котловины. Для зон разломов Беринга и Альфа установлен правосторонний характер смещения.

Между зонами разломов фундамент котловины характеризуется иным структурным планом. Наиболее отчётливо он выражен в строении массива

Вулканологов с вершинной вулканической постройкой Пийпа и сопряженного с ними грабена Командор. Исследования этих структур дают основание сделать вывод, что их образование связано вулканической активностью в результате растяжения, ось которого ориентирована в северо-восточном направлении. В свою очередь обстановка растяжения была связана с правосторонними сдвиговыми смещениями по зонам разломов Беринга и Альфа.

К северу от массива Вулканологов между зонами разломов в рельефе фундамента котловины выделяется серия блоков имеющих субмеридиональное простираие и ограниченных сбросами. В ряде случаев видно, что сбросовые уступы блоков в западной и восточной частях котловины обращены навстречу друг к другу и к её центру, что является типичным для структурного рисунка океанических хребтов. Спрединговое происхождение фундамента котлови-

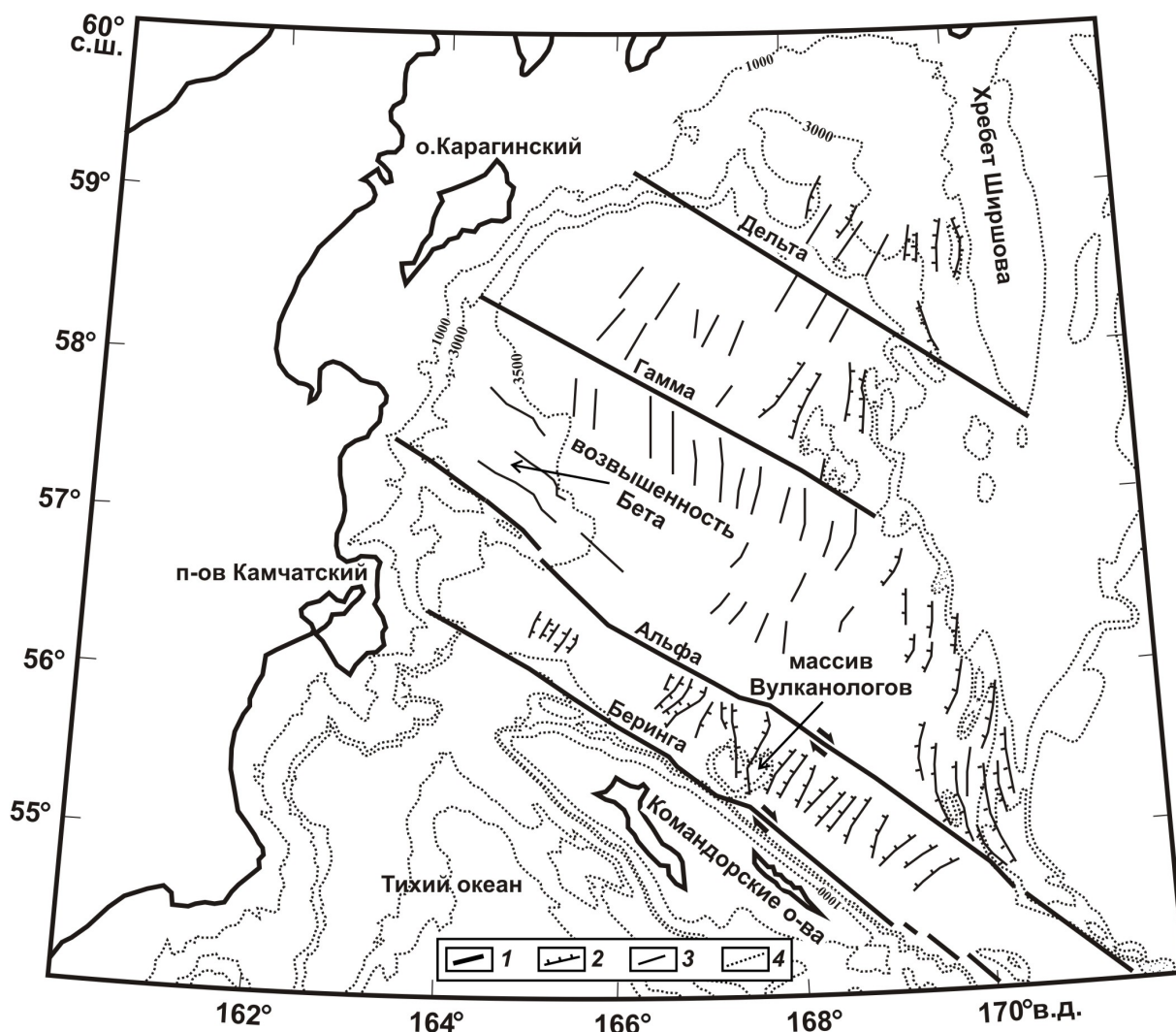


Рис. 2. Структура фундамента Командорской котловины по [4–5, 7] с изменениями: 1 – зоны разломов, стрелками показаны смещения; 2 – сбросы; 3 – оси блоков акустического фундамента; 4 – изобаты.

ны подтверждается наличием линейных магнитных аномалий с возрастом 21–9 млн лет [1].

Тепловой поток Командорской котловины

Тепловой поток котловины достаточно хорошо изучен, к настоящему времени получено более 100 измерений его значений. В распределении значений теплового потока на карте видны два максимума (рис. 3). Первый из них (до 230 мВт/м^2) находится примерно посередине между зонами разломов Беринга и Альфа. Локальные максимумы значений теплового потока, ограниченные изолинией 150 мВт/м^2 , расположены симметрично относительно крупной вулканотектонической структуры – массива Вулканологов.

Вторая зона аномально высоких значений теплового потока (до 200 мВт/м^2) расположена в западной части Командорской котловины между разломами Альфа и Гамма. Она прилегает к континентальному склону Восточной Камчатки между п-овом Озерный и о-вом Карагинский и в рельефе дна котловины соответствует возвышенности Бета. Эта область

по своим размерам превосходит южную область аномальных значений. Площадь участка со значениями более 150 мВт/м^2 составляет не менее $150\,000 \text{ км}^2$, а со значениями более 175 мВт/м^2 – около $25\,000 \text{ км}^2$.

Аномально высокие значения теплового потока в южной части Командорской котловины связывают с новейшим этапом тектономагматической активности. Она проявилась в развитии структур растяжения и внедрении магматических тел и вулканизме в зоне правосторонних сдвиговых дислокаций, ориентированной вдоль западного сектора Алеутской дуги. Для объяснения природы высоких значений теплового потока в западной части котловины были предложены две модели.

В первой модели [8] обе области высокого теплового потока соответствовали единой оси спрединга, которая в западной части котловины была ориентирована в субмеридиональном направлении, а в южной – в северо-западном (рис. 3а). После публикации работы были получены дополнительные

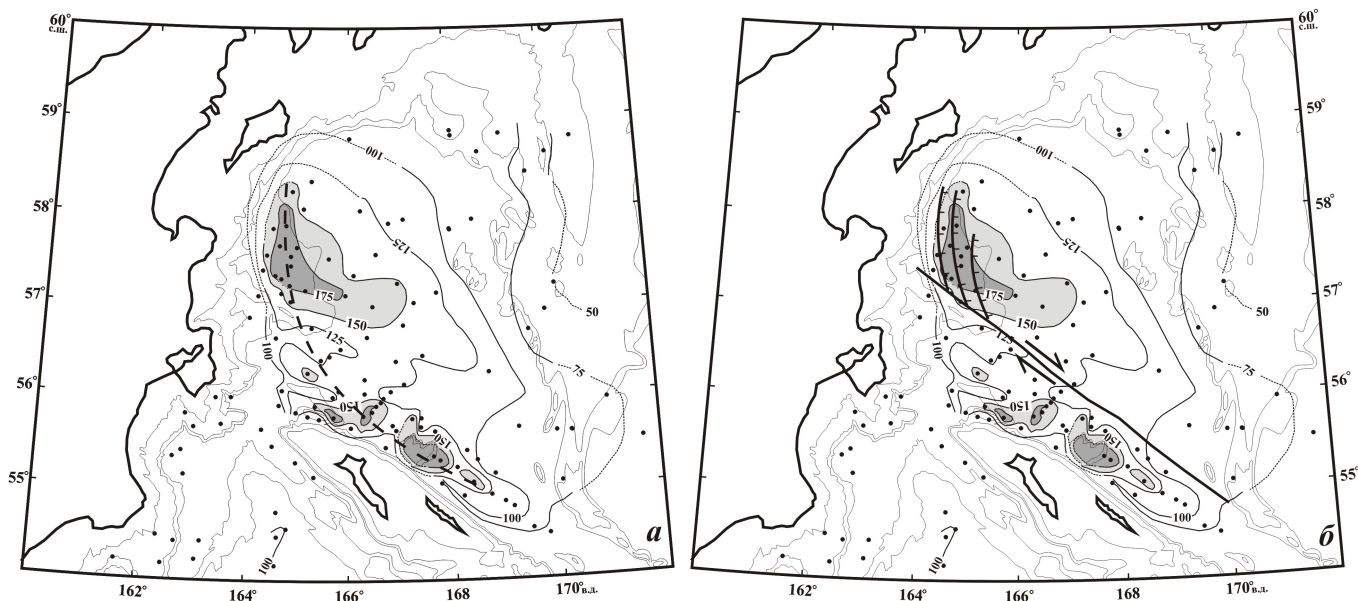


Рис. 3. Карты теплового потока ($\text{мВт}/\text{м}^2$) и модели, предложенные для объяснения природы его высоких значений в западной части Командорской котловины по [8] (а) и [4] (б). Пунктирной линией обозначена ось спрединга, линией со стрелками показан сдвиг, линиями с бергштрихами — сбросы. См. текст для дальнейшего пояснения.

данные по строению котловины и расположению осей растяжения/спрединга, которые явно противоречат этой модели и поэтому она не может считаться обоснованной.

Во второй модели [4] учитывались все полученные к тому времени данные, и был сделан вывод, что в западной части котловины высокие значения теплового потока соответствуют «периферийной зоне развития структур растяжения (головному чешуйчатому вееру растяжения) при реализации правосторонних сдвиговых смещений вдоль линеамента Альфа» (рис. 3б). Предлагаемая модель является более обоснованной, поэтому ниже рассмотрим данные, которые её подтверждают и данные, не укладывающиеся в предлагаемую схему.

Чисто из структурных соображений модель является очень логичной. Действительно, как следует из структурной геологии, на северо-западном окончании такого крупного правостороннего сдвига, как зона разломов Альфа могут возникать оперяющие сбросы, ориентированные в субмеридиональном направлении. Однако такого направления в структурном плане возвышенности Бета к настоящему времени пока не обнаружено.

В качестве доказательства активности северо-западного окончания зоны разломов Альфа приводится возникновение Озерновского землетрясения [4]. В очаге этого землетрясения произошли сдвиговые смещения и нодальные плоскости были ориентированы в северо-восточном и северо-западном направлениях. Если плоскостью разлома является северо-западная плоскость, то смещения будут правосторонними, что соответствует направлению смещения на разломе Альфа. Однако выбор этой плоскости не согласуется с ориентировкой очага

самого землетрясения, который простирается в северо-северо-восточном направлении и с большей вероятностью может рассматриваться в качестве плоскости разлома [2]. Кроме того, северо-восточнее очага Озерновского землетрясения разлом Альфа вряд ли является активным, поскольку землетрясения на всём его протяжении практически отсутствуют и большая часть эпицентров землетрясений приурочена к зоне разломов Беринга (рис. 4а).

Предполагается [4], что южная и западная зоны аномально высоких значений теплового потока структурно связаны и отражают единую зону правосторонних сдвиговых дислокаций вдоль разлома Альфа. В связи с этим возникает вопрос, почему размеры западной области превышают размеры южной. Логичнее было бы предположить, что в южной области, где существует современная область растяжения, связанная с активным разломом Беринга, прогрев коры должен происходить на больших площадях.

По мнению авторов настоящей работы, рассмотренная модель является возможным, но не единственным вариантом объяснения природы западной области аномально высоких значений теплового потока. Ниже мы предлагаем другую модель, основанную на кинематике границ плит, взаимодействующих в этом регионе и наличии астеносферных течений под сочленением Камчатки с Алеутской дугой.

Кинематика границ плит и астеносферные течения

Выделение литосферных плит основано, в первую очередь, на распределении эпицентров землетрясений на их границах. Используя этот критерий,

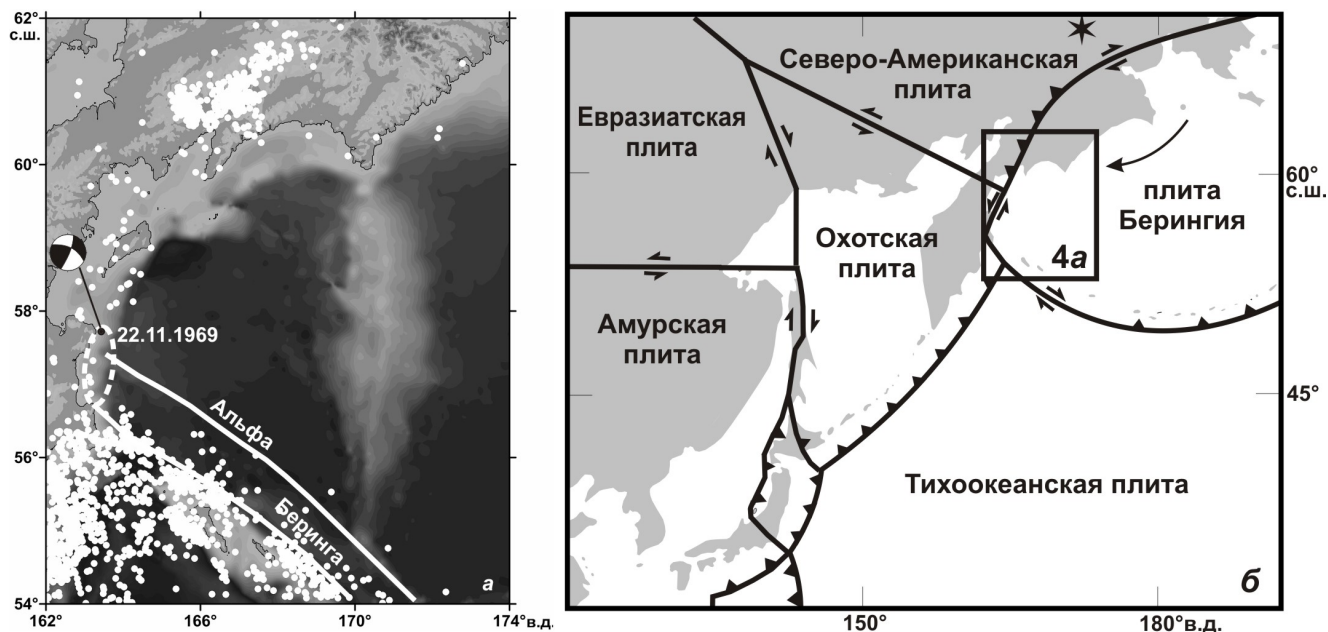


Рис. 4. Сейсмичность Командорской котловины с 1973 г. по 2013 г. (каталог PDE) (а) и границы плит северо-западной части Тихого океана (б). Показан очаг Озерновского землетрясения (белый пунктирный овал) и его механизм. Линиями со стрелками обозначены сдвиговые границы, с треугольниками — зоны субдукции и коллизии. Звездочка обозначает полюс вращения плиты Берингия, а стрелка — направление её вращения по [3].

в области сочленения Камчатки и Алеутской островной дуги были выделены [3, 11, 14] четыре плиты: Тихоокеанская, Охотская, Северо-Американская и Берингия (рис. 4 б). Наибольший интерес для нашего исследования представляет граница, протягивающаяся от сочленения Камчатки с Алеутской островной дугой на северо-восток и отделяющая плиту Берингия от Охотской и Северо-Американской плит. Данная граница не является единой, поскольку к ней в районе о. Карагинский под прямым углом подходит другая граница, которая простирается в северо-западном направлении, разделяя Охотскую и Северо-Американскую плиты.

Для участка границы, начинающегося от о. Карагинский и протягивающегося далее на северо-восток, по фокальным механизмам землетрясений и структурным данным определяется конвергентный характер смещения с правосдвиговой составляющей по плоскостям, ориентированным в северо-восточном направлении, т. е. параллельно границе [3]. Положение полюса вращения плиты Берингия даёт основание считать, что компонента сдвига уменьшается вдоль этой границы с севера на юг с соответствующим увеличением компоненты сжатия. Данные о характере смещения на границе к югу от о. Карагинский немногочисленны, но существенно отличаются от смещений на границе плит к югу от острова. По механизму очага Озерновского землетрясения, было определено, что он является левосторонним сдвигом по плоскости, ориентированной в северо-восточном направлении [2].

Возвышенность Бета с областью высокого теплового потока примыкает к этой сдвиговой границе.

Есть все основания полагать, что геодинамическая обстановка аналогична здесь той обстановке, которая существует к северу от зоны разломов Беринга, сдвиговые смещения вдоль которой приводят к формированию обстановки растяжения с проявлением вулканизма, приуроченными к массиву Вулканологов и вулкану Пийпа. Поэтому природа западной зоны высокого теплового потока может быть связана с растяжением и генерацией вулканических и магматических процессов, обусловленных смещениями вдоль границы плит, расположенной западнее и имеющей северо-восточное простирание. В этом случае структурные элементы возвышенности Бета должны иметь северо-западное — юго-восточное простирание. Подтверждением этого является северо-западная ориентировка изолиний мощности осадочного чехла на карте, приведенной в работе [4], что подразумевает аналогичную ориентировку структур акустического фундамента (рис. 2). Кроме сдвиговой компоненты смещения вдоль южного отрезка западной границы плиты Берингия могут существовать и другие движущие силы, обеспечивающие тектономагматическую активность в западной части котловины. Одной из них, вероятно, являются астеносферные течения.

Изучению астеносферных течений под Камчаткой был посвящён ряд исследований, начиная с работы [13]. По данным сейсмической томографии было исследовано строение мантии до глубины 200 км и показано, что к северу от сочленения Камчатки с Алеутской островной дугой погружающаяся плита отсутствует (рис. 5а,б). В тоже время пониженные скорости сейсмических волн под сочленением

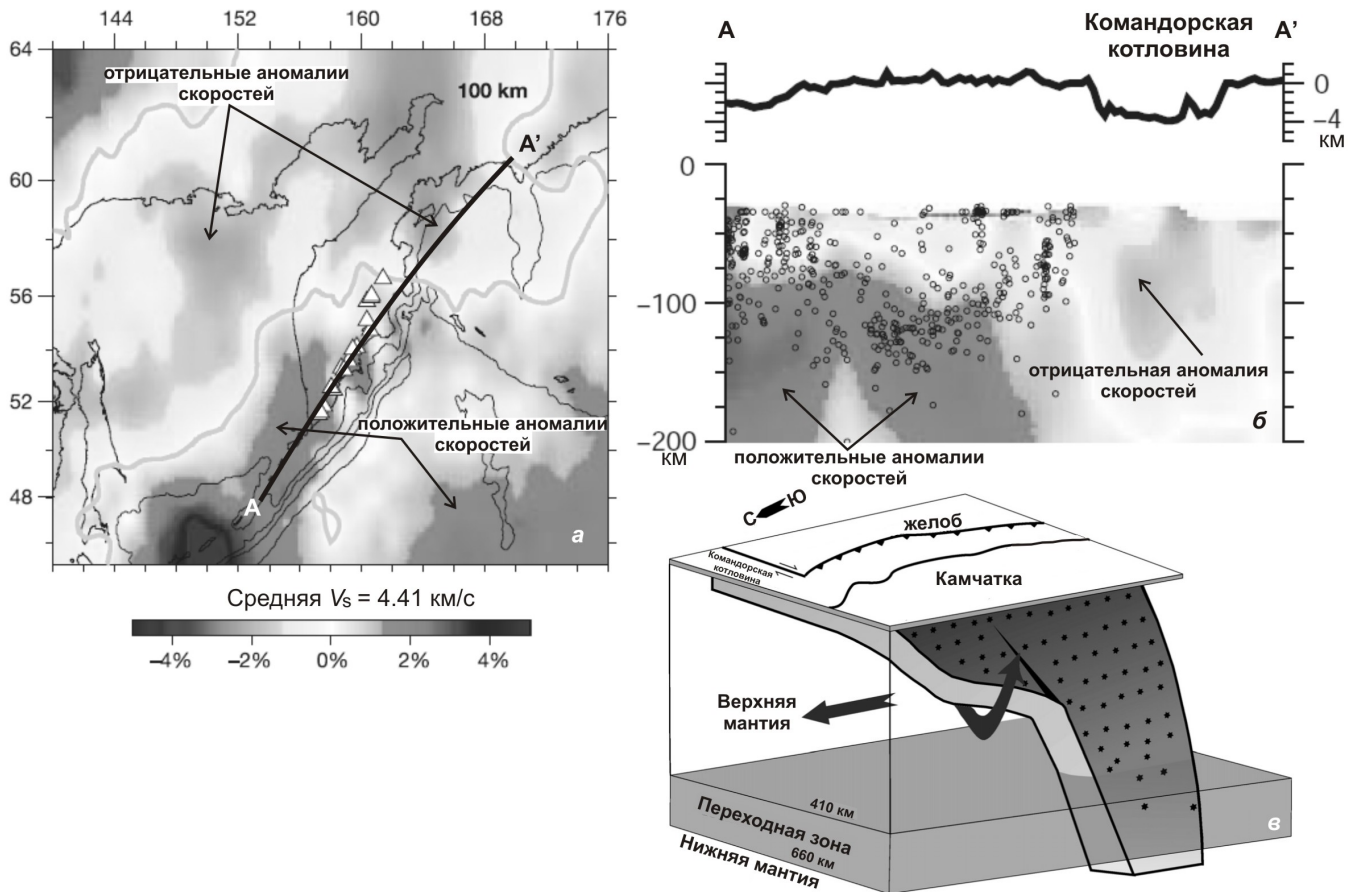


Рис. 5. Карта распределения аномалий в скоростях сейсмических волн для глубины 100 км (а) и вертикальный разрез для скоростных аномалий S -волн (б) по [13] с упрощениями. Серыми линиями на карте показаны контуры средних значений скоростей для этого региона, треугольниками — вулканы. На разрезе незалитые кружки обозначают гипоцентры землетрясений в полосе 20 км. Выше разреза приведён профиль рельефа. Положение разреза показано на рис. 5а. Трёхмерное изображение Тихоокеанской плиты, погружающейся под Камчатку, на котором стрелками показаны два астеносферных течения (в). Первое огибает часть плиты, оставшейся после отрыва её основной части, а второе проходит под Командорскую котловину по [12] с упрощениями. Звездочками схематично обозначены гипоцентры землетрясений.

и Командорской котловиной дали авторам основание предполагать наличие в мантии астеносферных течений, которые огибают погружающуюся Тихоокеанскую плиту и проникают под область Командорской котловины.

Аналогичные результаты были получены в работе [12], где скоростная структура мантии была определена до глубины 700 км. Было установлено, что глубина зоны с повышенными скоростями S -волн, которая соответствует погружающейся плите, уменьшается вдоль Камчатки с юга на север и вблизи её сочленения с Алеутской дугой полностью исчезает. В области сочленения на томографических изображениях присутствуют низкоскоростные аномалии, которые интерпретируются в качестве астеносферных течений. Авторы обеих работ приходят к выводу, что возникновение астеносферных течений, которые проходят под северную Камчатку и Командорскую котловину, происходит

в результате отрыва субдуцирующей плиты на сочленении Камчатки с Алеутской дугой.

Наличие астеносферного потока под западной частью Командорской котловины может подтверждаться рельефом поверхности геоида. Поверхность геоида широко используется при геофизических исследованиях [10]. Например, моделирование аномального теплового потока, поверхности геоида и характера рельефа на поднятии о-вов Зелёного Мыса в Северной Атлантике показало, что наблюдаемые данные лучше всего соответствуют динамическому воздыманию поднятия за счёт восходящего термального плюма в подстилающей мантии [9]. Наличие аналогичного плюма/астеносферного течения можно предполагать для западного участка котловины, где область высокого теплового потока, поднятие Бета и зона максимальных высот поверхности геоида в Командорской котловине пространственно совпадают друг с другом (рис. 6).

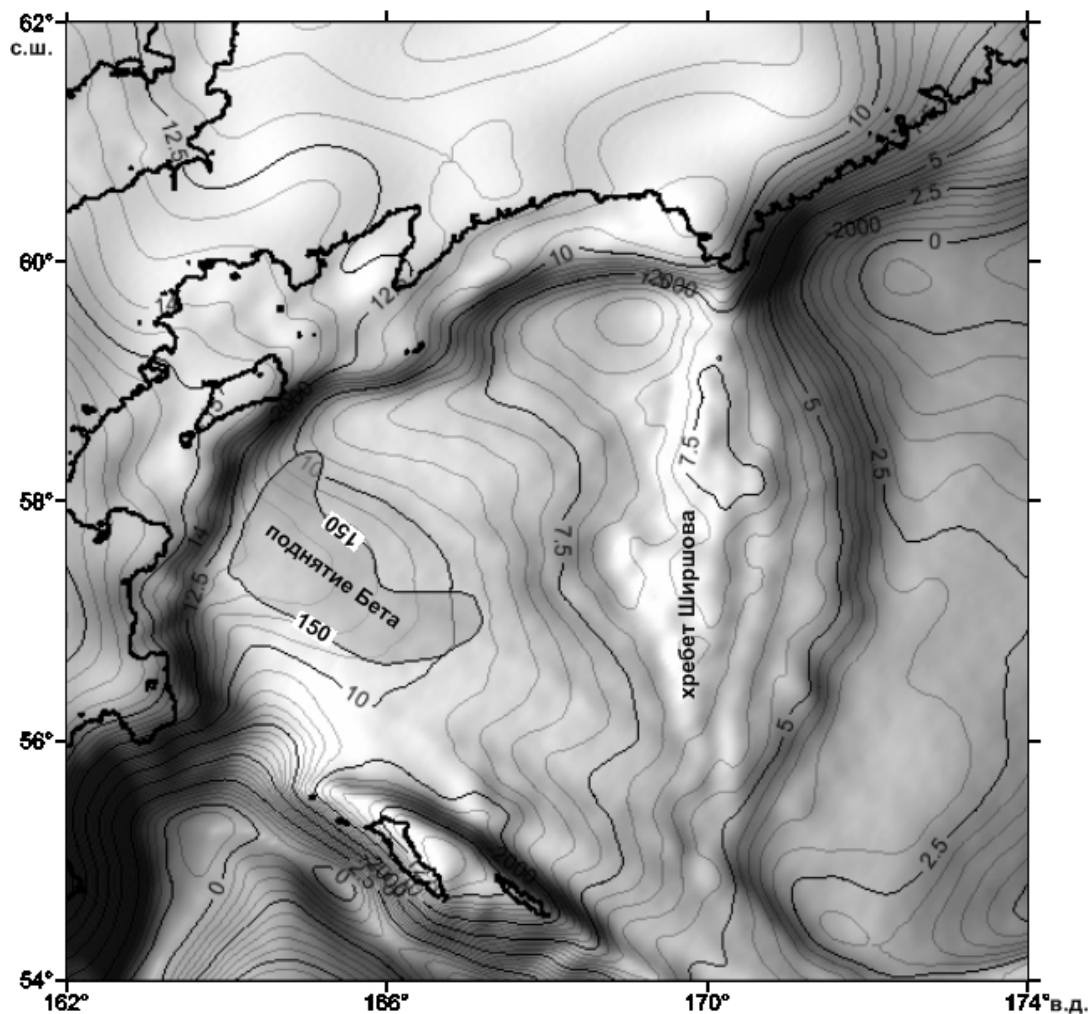


Рис. 6. Поверхность геоида Командорской котловины (м) и контур западной области высокого теплового потока со значениями выше 150 мВт/м².

Геодинамическая модель

Раскрытие в Командорской котловине, судя по линейным магнитным аномалиям, началось 21 млн л. н. и закончилось 9 млн л. н. [1], за исключением его южного сегмента, где на массиве Вулканологов и вулкане Пийпа тектоническая и вулканическая активность продолжается до настоящего времени.

Возраст начала активизации тектономагматических процессов в западной части котловины, по нашему мнению, соответствует возрасту возникновения астеносферных течений, связанных с отрывом плиты. Отрыв плиты Командорской котловины произошёл к северу от сочленения 10–5 млн л. н., в результате чего островодужный вулканизм к северу от точки сочленения прекратился [13]. Отрыв плиты наряду с прекращением островодужного вулканизма привёл к возникновению астеносферных течений, одно из которых было направлено в Командорскую котловину. Это астеносферное течение, вероятно, способствовало трансформации зоны субдукции в левосдвиговую границу плит. В результате на более древней коре Командорской

котловины с возрастом 20 млн лет возникла система разломов, соответствующая обстановке растяжения. При этом произошёл раскол коры Командорской котловины с внедрением магматического материала и, возможно, с образованием вулканических построек. Вызванное этим процессами повышение теплового потока привело к потере естественной остаточной намагниченности. Это может служить объяснением трудностей, возникающих при корреляции линейных магнитных аномалий на возвышенности Бета [1].

Таким образом, высокий тепловой поток в западной части котловины объясняется выплавлением магмы из астеносферного течения, направленного с юга на север, в условиях растяжения, обусловленного левосторонними сдвиговыми смещениями вдоль южного участка границы плит (рис. 7). Здесь существует прямая аналогия с южной областью высокого теплового потока, образование которой также связано с растяжением, перпендикулярным сдвиговой границе, приуроченной к зоне разломов Беринга. Для западной области наличие астено-

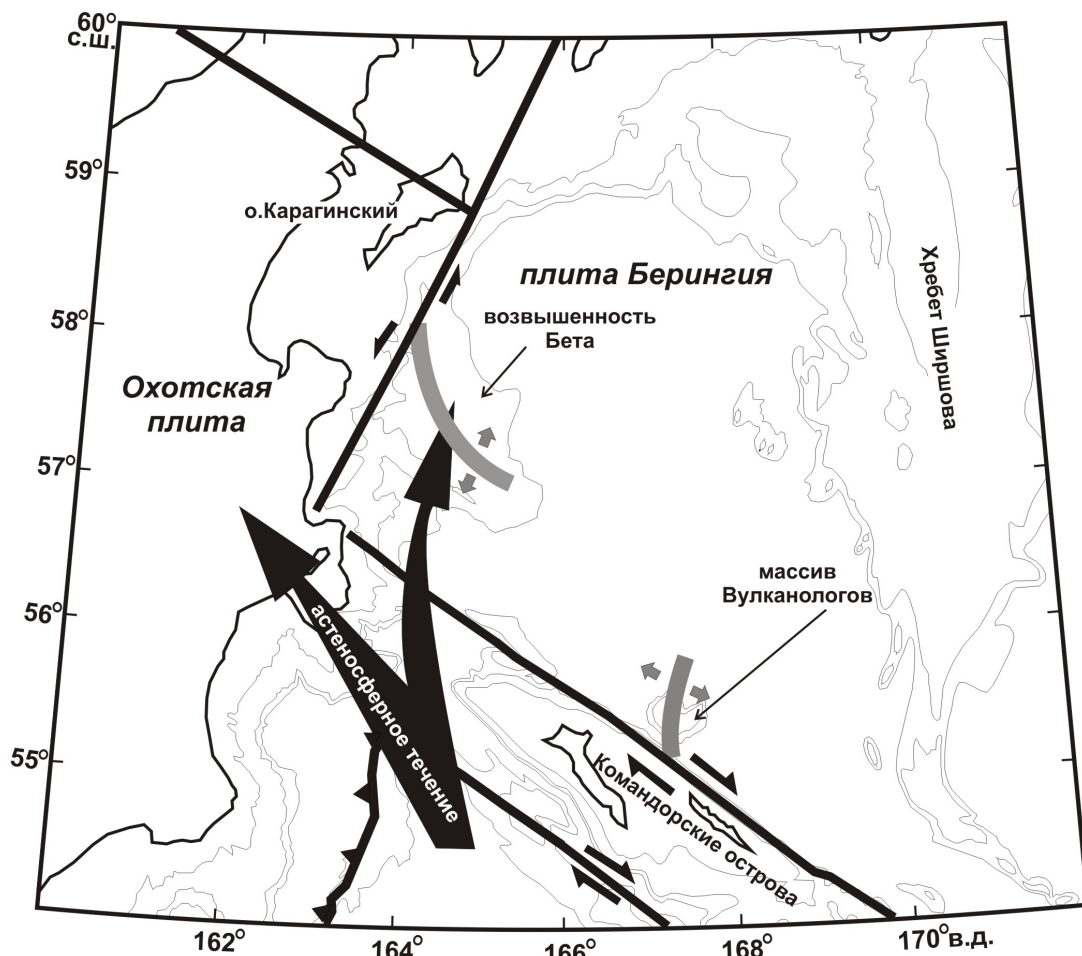


Рис. 7. Геодинамическая модель Командорской котловины с наличием двух зон растяжения с магматической/вулканической активностью, возникающих на сдвиговых границах плиты Берингия.

сферного потока приводит к тому, что эта область по своим размерам почти вдвое превышает южную область повышенного теплового потока.

Заключение

В отличие от срединно-океанических хребтов спрединг в задуговых котловинах имеет ряд специфических черт, к которым относятся перескоки его осей, наличие параллельных осей растяжения (диффузный спрединг) и т.д. Диффузный спрединг предполагается, например, для южного сектора Командорской котловины на основании моделирования теплового потока [6].

В данной работе предложена модель, предполагающая одновременное наличие двух осей современного растяжения, приуроченных к массиву Вулканологов и возвышенности Бета и ориентированных соответственно в северо-восточном и северо-западном направлениях. Подобное расположение осей растяжения обусловлено кинематикой движений на границах плиты Берингия для обоих случаев и дополнительным влиянием астеносферного течения для возвышенности Бета.

Следует отметить, что как предлагаемая модель, так и модель Селивёрстова [4] могут быть приняты

или отклонены только после проведения детальных геолого-геофизических исследований на возвышенности Бета, которые дадут возможность установить её структурный план и состав пород фундамента.

Список литературы

1. *Валяшко Г. М., Чернавский Г. Б., Селивёрстов Н. И., и др.* Задуговой спрединг в Командорской котловине // Докл. АН ССР. 1993. Том. 338. №2. С. 212–216.
2. *Зобин В. М., Федотов С. А., Гордеев Е. И., Митякин В. П.* Сильные землетрясения на Камчатке и Командорских островах в 1961–1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 3–23.
3. *Ландер А. В., Левина В. И., Иванова Е. И.* Олюторское землетрясение 20(21) апреля 2006 г. $M_w = 7,6$: сейсмическая история региона и предварительные результаты исследования серии афтершоков. Олюторское землетрясение 20(21) апреля 2006 г., Корьякское нагорье. Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2007. С. 14–33.
4. *Селивёрстов Н. И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир 1998. 164 с.
5. *Селивёрстов Н. И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Пет-

- ропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
6. Яновский Ф. А., Сугробов В. М., Селивёрстов Н. И. Тепловое поле и геотермическая модель литосферы Командорской котловины Берингова моря // Вулканология и сейсмология. 1997. №2. С. 16–31.
 7. Baranov, B.V., Seliverstov, N.I., Muravev, A.V., et al. The Komandorsky Basin as a product of spreading behind a transform plate boundary // Tectonophysics. 1991. Vol. 199. P. 237–269.
 8. Bogdanov N.A., Neprochnov Yu.P. Geology of the Bering Sea deep basins. Origin and History of the Marginal and Inland Seas. Proc. 27th Int. Geol. Congr. Utrecht: VNU Science Press. 1984. Vol. 27. P. 1–17.
 9. Courtney R. C., White R. S. Anomalous heat flow and geoid across the Cape Verde Rise: evidence for dynamic support from a thermal plume in the mantle // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1986. Vol. 87. N 3. P. 815–867.
 10. Featherstone W. E. On the Use of the Geoid in Geophysics: A Case Study Over the North-West Shelf of Australia // Exploration Geophysics. 1997. Vol. 28. № 1. P. 52–57.
 11. Hindle D., Mackey K. Earthquake recurrence and magnitude and seismic deformation of the northwestern Okhotsk plate, northeast Russia // Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116. B02 301. doi:10.1029/2010JB007409.
 12. Jiang G., Zhao D., Zhang G. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka // Tectonophysics. 2009. Vol. 465. P. 190–203.
 13. Levin V., Shapiro N., Park J., Ritzwoller M. Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // Nature. 2002. Vol. 418. P. 763–767.
 14. Savostin L. A., Zonenshain L.P., Baranov B.V. Geology and plate tectonics of the Sea of Okhotsk region. Geodynamics of the West Pacific-Indonesian region. Geodyn.Ser. Boulder: AGU. 1983. Vol. 11. P. 189 – 222.