

В сборнике представлены статьи, отражающие результаты исследований по физике очага землетрясения и совокупности очагов (сейсмическому режиму). Рассмотрены соотношения между параметрами очагов, особенности форшокового и афтершокового процессов больших землетрясений, эффект затишья перед ними, миграция очагов, результаты исследования сейсмического течения торных масс и напряженного состояния горных пород в естественном залегании. Приводятся данные по структуре и особенностям сейсмических зон. Статьи содержат детальный сейсмологический материал и оригинальные теоретические модели. Сборник представляет интерес для широких кругов сейсмологов и сейсмогеодотов.

Ответственный редактор
член-корреспондент АН СССР
Ю.В. Ризниченко

СЕЙСМИЧНОСТЬ И ГЕОДИНАМИКА

А. А. Гусев, Л. С. Шумилина

ГЕОМЕТРИЯ СЕЙСМОАКТИВНОГО ОБЪЕМА КОРЫ И МАНТИИ В РАЙОНЕ КАМЧАТКИ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВОВ

Работа посвящена попытке обрисовать пространственный объем, охваченный сейсмическим процессом на стыке океанического и континентального блоков мантии в районе Камчатки. Детальные сейсмологические исследования, проводимые с 1961 г. на Камчатке [1], позволили накопить большой материал по координатам очагов землетрясений, определенных с довольно высокой точностью, что и создало предпосылки такого исследования.

Интерес к изучению пространственного распределения землетрясений в районах островных дуг повысился в последнее время в связи с идеями "тектоники плит". В отличие от авторов некоторых подобных работ, мы не задавались определенной моделью движения блоков, а хотели получить надежный исходный материал для геодинамических построений.

Блок коры и мантии, в котором в основном сосредоточены очаги землетрясений, мы будем далее называть сейсмоактивным объемом. Термин "фокальная зона", употребляемый в работах С.А. Федотова [1, 2], и термин "фокальный слой", введенный П.И. Токаревым [3], имеют близкий смысл, но они не определены точно. Во избежание терминологических противоречий мы предпочли ввести в данной работе вместе с конкретной методикой и соответствующий термин.

Пространственное представление о конструкции сейсмоактивного объема проще всего может быть получено из набора вертикальных разрезов в крест структуры. Подобные разрезы по детальным данным публиковались неоднократно, в частности в работе С.А. Федотова и др. [2] приведен впервые полученный С.А. Федотовым разрез для Южных Курил. Статьи о камчатских землетрясениях в сборниках "Землетрясения в СССР" [1] также содержат такого рода разрезы. Использование материала за девяностилетний период (1964–1972 гг.) дало нам возможность провести разрезы с относительно высокой детальностью (примерно через 100 км).

Разрезы с нанесенными гипоцентрами не совсем подходят для нашей задачи: по ним невозможно получить четкое геометрическое представление о сейсмоактивном объеме. Поэтому нами было принято

решение оконтуриТЬ этот объем по землетрясениям с энергетическим классом выше некоторого фиксированного уровня K_0 и не пользоваться никакими сглаживающими процедурами, в частности, типа расчета объемной активности. Помимо отсутствия искажений, вызываемых сглаживанием, такой подход, по нашим представлениям, дает более надежные долговременные характеристики сейсмического процесса, снимая хотя бы частично влияние флюктуаций сейсмической активности во времени.

Выбор уровня K_0 диктовался следующими соображениями: 1) полнотой материала по региону как в плане, так и по глубине; 2) сопоставимостью с подобными построениями для других регионов, полученными по данным мировой сейсмической сети; 3) максимальной выразительностью вертикальных разрезов при достаточной детальности. Всем этим требованиям соответствует выбор

$$K_0 = K_{S1,2}^{\Phi 68} = 11 \quad (-M_S = 4,0; -m_b = m_{pv} = 4,5).$$

Ошибки в координатах и глубинах землетрясений в данном регионе были предметом специального исследования [4]. На основании этой работы можно считать, что ошибка определения эпицентра в пределах местной сети составляет в среднем около 10 км, а максимально 20–25 км за периметром сети камчатских станций. Координаты эпицентров, по данным удаленных станций сетей ЕССН СССР¹ и БГС США², систематически смешены в среднем на 20–25 км к северо-западу, причем это различие в координатах с глубиной уменьшается. Для наших целей это смещение несущественно, но важно для сопоставления результатов.

Ошибки в определении глубины превышают ошибки в эпицентре в 1,5–2 раза, достигая 30–40 км за периметром сети. Поэтому для глубин до 150 км очаги землетрясений были разбиты на интервалы шириной 30–40 км и относились к средневзвешенной для интервала глубине (0–30, $\bar{H} = 15$; 31–70, $\bar{H} = 40$; 71–119, $\bar{H} = 90$; 120–150, $\bar{H} = 130$ км). Землетрясения с большими 150 км глубинами гипоцентров относились к своей глубине.

На схеме (рис. 1) показаны секторы, по осевым вертикальным плоскостям которых строились разрезы проектированием всех землетрясений данного сектора на его осевую плоскость. Границы секторов вместе с нумерацией их (4–12) заимствованы из работы П.И. Токарева [3]; секторы "а" и "б" добавлены нами.

Данные вне границ секторов, в частности из района о-ва Медного и Северных Курил, не использовались из-за низкой точности определения здесь координат землетрясений.

Полученные разрезы приведены на рис. 2,а. Границы объема даны огибающими ломаными линиями. Для первых трех интервалов глубин проведены также линии, отделяющие справа налево 25, 50, 75%

¹ Единая система сейсмических наблюдений СССР.

² Береговая геофизическая служба США.

землетрясений с $K > 11$ для каждого слоя (тонкие линии внутри огибающей на рис. 2,а). Ореол вокруг разрезов образуют проекции очагов землетрясений с $K = 9-10$, полнота которых гарантирована только для части разрезов и для глубин менее 180 км. Эти данные приведены для контроля, но в трех случаях (разрезы 5, 7, 9) по ним экстраполирован разрез на те глубины, где землетрясений с $K > 11$ не отмечено.

На рис. 2,б приведены разрезы в смещенном виде. Разрезы совмещались по положению на них действующих вулканов. Если их было на разрезе несколько, бралась средняя точка. Попытка совместить разрезы по оси глубоководного желоба оказалась гораздо менее удачной. При рассмотрении разрезов не следует забывать, что плоскости простирания для них не параллельны. Разрезы естественно разделились на две группы: северную – секторы 7-9 и южную – секторы 10-12, что никак не предполагалось заранее. Оказалось, однако, что в районе границы секторов 9 и 10 форма разрезов заметно изменяется.

Следует обсудить вопрос, насколько полученная нами картина устойчива во времени, учитывая, что характерные времена длительности сейсмических процессов – сотни лет. Сечения, полученные нами по краткосрочному ряду наблюдений, вероятно, искажены в сторону уменьшения количества данных. Мы, в частности, не приаем значения участкам с "нулевой" толщиной объема, которые видны на большей части разрезов. Мы специально сравнивали наши разрезы с разрезами по данным за один-три года и можем сказать, что характерные черты разрезов проявляются почти сразу (в частности, специфическая форма разреза 10). Добавление данных скорее дает эффект заполнения белых пятен, чем расширяет разрезы, так что можно надеяться на устойчивость разрезов во времени. Мы сознаем слабость такой аргументации, но любые строгие соображения должны использовать заведомо неверное предположение о стационарности сейсмического процесса.

Заметим попутно, что гипоцентры, противоречившие четкой картине разрезов, специально проверялись, вплоть до анализа сейсмограмм, и нередко оказывались ошибочными. Большинство ошибок связано с отмеченной в работе [4] кинематической неразличимостью землетрясений с глубинами 0-30 и 80-100 км в отсутствие близкой станции. Проверка и уточнение глубин землетрясений привели к тому, что наши разрезы оказались более узкими, чем если бы они были построены по опубликованным в сборниках "Землетрясения в СССР" каталогам камчатских землетрясений. Однако отнюдь не все "неожиданные" гипоцентры были ошибочны (см. особо разрезы по секторам 10 и 11).

Итак, можно полагать, что с точностью порядка 10-20 км нам удалось оконтуриТЬ область, охваченную интенсивным сейсмическим процессом в исследуемом районе.

Анализ полученных изображений мы начнем с вертикальных разрезов (см. рис. 2). Специфические черты северной части региона –

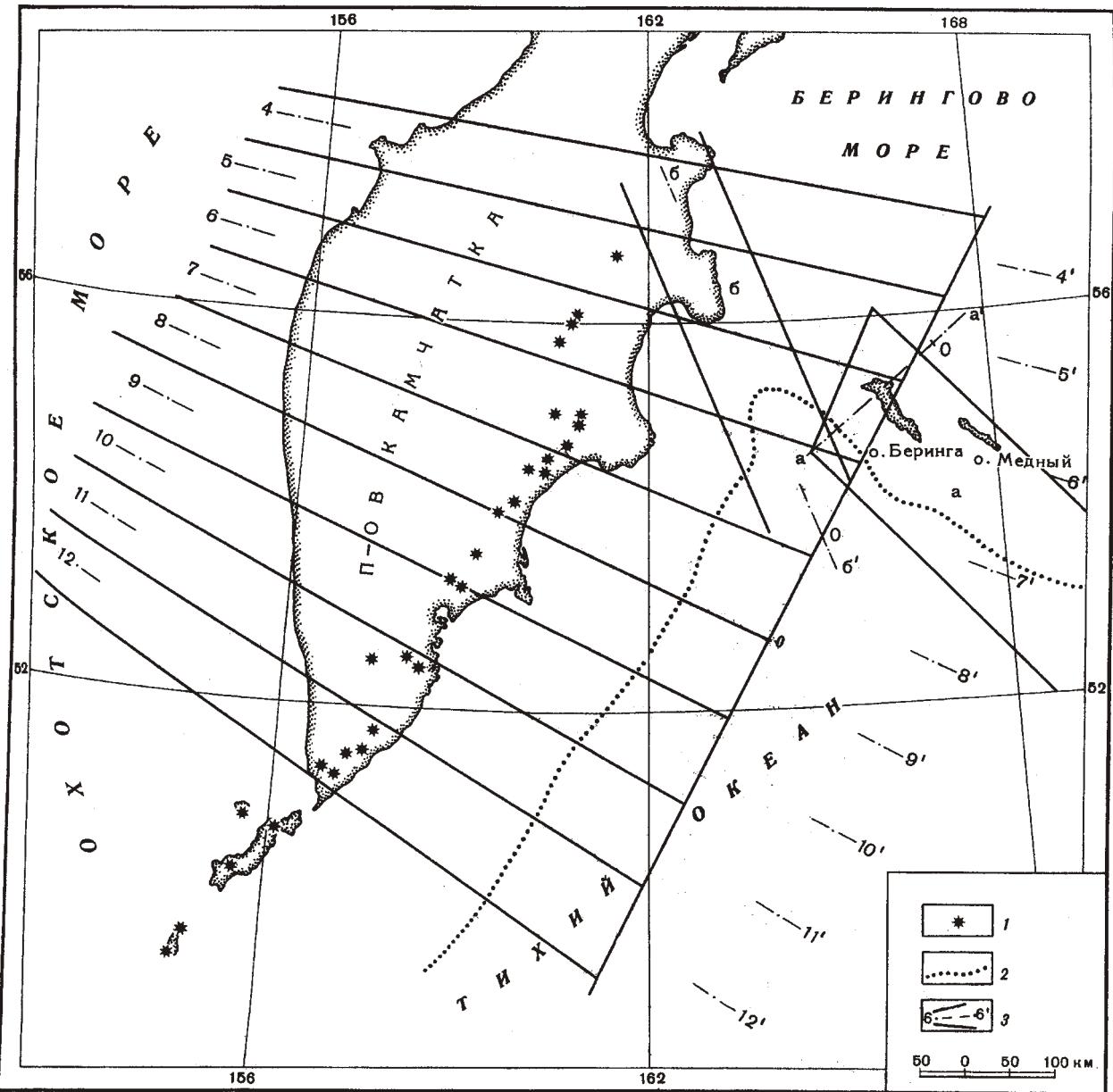


Рис. 1. Схема расположения разрезов сейсмоактивного блока по данным за 1964-1972 гг.

1 - вулканы; 2 - ось глубоководного желоба; 3 - секторы и осевые линии, по которым построены разрезы рис. 2

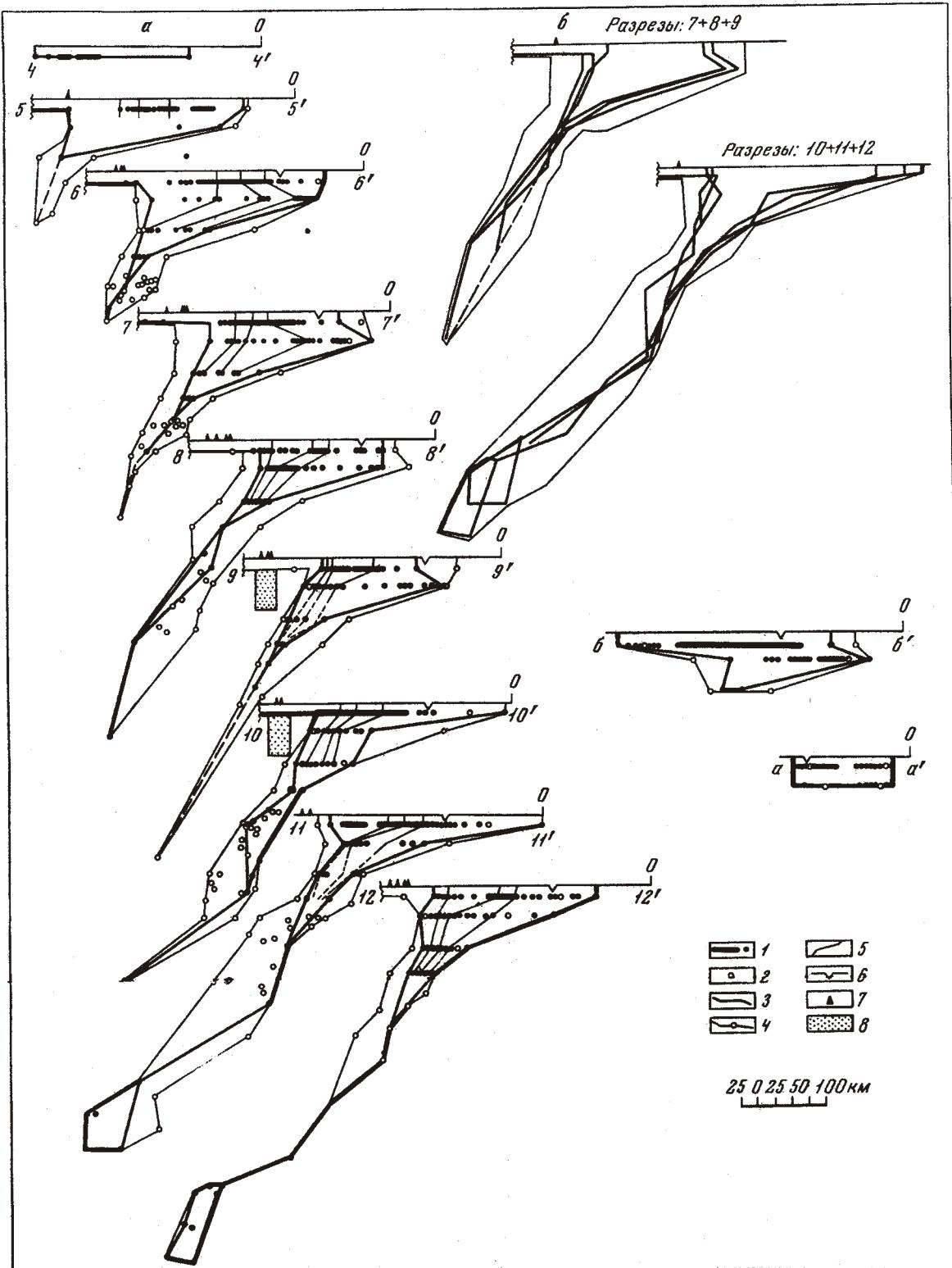


Рис. 2. Разрезы сесмоактивного блока

а - вертикальные разрезы по секторам; **б** - совмещенные разрезы.

1 - очаги землетрясений $K > 11$; 2 - очаги землетрясений $K=9-10$; 3 - граница сесмоактивного блока по землетрясениям $K > 11$; 4 - границы по землетрясениям $K > 9$; 5 - линии, отделяющие справа налево 25, 50, 75% землетрясений $K > 11$; 6 - ось глубоководного желоба; 7 - вулканы; 8 - гипотетический магматический очаг Авачинского вулкана.

области стыка структур – будут рассмотрены особо, а пока мы в основном будем иметь в виду область секторов 7–12. На глубинах свыше 70–100 км, как хорошо известно из более ранних работ, сейсмоактивный объем имеет вид относительно тонкого слоя. Толщина его оценивалась для Курило–Камчатской зоны в 50–70 км [2, 3], в то время как в работе [5] получились для других островных дуг гораздо меньшие оценки.

Если не аппроксимировать форму объема какой-либо простой поверхностью, то толщина на глубинах свыше 100 км, по нашим данным, составляет в среднем 50 км по $K > 9$ и менее 10 км по $K \geq 11$. Максимальные значения – 80 и 40 км соответственно. Средняя оценка для $K_0 > 11$ явно занижена из-за малого периода наблюдений. Тем не менее после совмещения разрезов в двух группах (см. рис. 2, б) средняя ширина составляет 25 км, а максимальная – те же 40 км. Можно поэтому считать, что толщина сейсмоактивного объема на глубинах свыше 100 км составляет не более 15–25 км в среднем и до 40 км максимально (по $K_0 > 11$).

Малая толщина объема позволяет довольно четко прослеживать подобие разрезов вдоль островной дуги. Подробное рассмотрение формы разрезов северного и южного типов не позволяет говорить об изломах фокального слоя, неоднократно отмечавшихся в связи с подобного рода построениями. Форму разрезов можно с одинаковым успехом приближать как ломаной, так и гладкой кривой. Ясно, однако, что для северных разрезов угол падения (в геологическом смысле, т.е. с горизонталью) растет с глубиной до углов 60–80°, в то время как южные имеют S-образную форму, круто падают в верхней части разреза, выполаживаются на глубинах порядка 350 км до углов 25–30° и затем опять угол падения нарастает.

Участок дуги, где изменяется форма разрезов (район Авачинской группы вулканов), примечателен в тектоническом отношении. Здесь изменяется структура горного сооружения дуги, а цепочки вулканов вдоль дуги прерываются, и Авачинская группа вулканов контролируется поперечной к дуге структурой.

Одним из наиболее существенных результатов настоящей работы является выделение весьма примечательной западной, или, как мы будем говорить, тыловой, границы сейсмоактивного объема на глубинах до 90–110 км. Эта граница расположена примерно одинаковым образом по отношению к оси пояса вулканов (на расстоянии 50±10 км в плане) и имеет приблизительно одинаковую форму на всех разрезах. Она близвертикальна на глубинах 60–70 км, а далее уходит под континентальный блок под круглыми углами.

Асейсмичность мантии на глубинах 30–70 км к западу от тыловой границы в полосе шириной 70–100 км не абсолютна: здесь есть редкие землетрясения с $K < 10$. Далее к западу подкоровых землетрясений не отмечается. Тем не менее резкость выделенной границы весьма велика. Очаговые зоны больших ($M - 8$) поверхностных землетрясений располагаются почти рядом с тыловой границей с востока, в то время как к западу максимальная энергия зем-

землетрясений соответствует $M \sim 3,5$. Плотность выделения сейсмической энергии изменяется на расстоянии 30–50 км не менее чем на шесть порядков.

Экстраполяция тыловой границы вверх вполне оправдана, так как и в верхнем слое ($H = 0$ –30 км) к западу от нее сейсмичность резко падает, хотя здесь все же наблюдаются землетрясения с магнитудой до 6,5 (землетрясение 1943 г. в Срединном хребте).

На разрезах 9 и 10 рис. 2 можно сопоставить положение тыловой границы с экранирующим упругие волны объемом под Авачинской группой вулканов, гипотетическим магматическим очагом [6].

Возможно, что резкий градиент сейсмической активности попечек тыловой границы связан не только с падением интенсивности механического перемещения блоков, но и с изменением физических свойств мантии, например, с повышенной ее пластичностью под вулканическим поясом.

Отметим важность выделения тыловой границы сейсмоактивного объема для задач оценки сотрясаемости. Эта граница дает непосредственную оценку предельно близкого к населенной суше расположения очагов сильнейших землетрясений и позволяет не привлекать для этой цели корреляций сейсмической активности с энергией максимального землетрясения [7, 8].

С восточной, океанической, стороны граница сейсмоактивного объема на глубинах до 100 км нерезкая и не прослеживается столь четко ни от разреза к разрезу, ни в плане. По направлению к суше восточная граница плавно изгибаются вниз, причем круче всего на глубине около 80 км.

Со стороны океана сейсмичность явно заходит за осевую линию и даже за океанический борт глубоководного желоба. Ось желоба не коррелируется с очевидными чертами сейсмичности.

Рассмотрение границ сейсмоактивного объема в плане на разных глубинах показывает, что с океанической стороны эти границы вдоль дуги не выдержаны для верхних трех слоев, и добавление новых данных вполне может их изменить, хотя для третьего слоя граница выглядит довольно уверенно. Зато с континентальной стороны эти границы весьма четко прослеживаются вдоль дуги, что и следовало ожидать на основе изложенного относительно тыловой границы. В подтверждение устойчивости западных границ можно отметить и такой факт, что при переходе от $K_0 = 11$ к $K_0 = 12$ (снижение объема данных более чем вдвое) граница для слоя 30–70 км в плане смещается в среднем на 5 км и лишь в одном месте, напротив Авачинской губы, – на 15 км, а для слоя 70–110 км не смещается практически совсем.

На разрезах попечек дуги распределение землетрясений явно асимметрично.

Нижний край сейсмоактивного объема быстро набирает глубину около 200 км к сектору 5, затем плавно углубляется до 40 км в секторе 8, почти горизонтален в секторах 9, 10 и снова довольно резко уходит на 550 км в секторах 11, 12.

В области стыка Курило-Камчатской и Алеутской дуг сейсмоактивный объем устроен довольно своеобразно. В работе С.А. Федотова и др. [9] отмечалось, что стык имеет характер примыкания Алеутской сейсмической зоны к Курило-Камчатской, что четко выяснилось после Озерновского землетрясения ($M=7,7$) в 1969 г. Там же высказано предположение о расщеплении Курило-Камчатской зоны на две сейсмоактивные полосы. Это расщепление хорошо заметно при сравнении разрезов 4 и 5. От п-ова Кроноцкого западная полоса с выклинивающейся зоной промежуточных землетрясений заворачивает на север и затухает за вулканом Шевелуч, а восточная, более активная, тянется к северо-северо-востоку через п-ов Камчатский мыс вдоль континентального склона Берингова моря и затухает у о-ва Карагинского.

Сейсмоактивный объем Алеутской дуги в районе Командорских островов резко отличается от объема в районе Камчатки. Он гораздо уже, почти симметричен и лишен землетрясений с глубинами более 50 км (см. рис. 2,а). Отсутствие промежуточных и глубоких землетрясений – вообще характерная черта участка Алеутской зоны к востоку от 180° в.д. [10]. В нашем материале единственное землетрясение с глубиной 70-80 км расположено возле стыков жеблов. Еще два таких землетрясения имели ненадежно определенные глубины. Все три землетрясения не участвовали при оконтуривании блока, но на разрезы рис. 2 они нанесены.

Отметим также, что и в районе Командорских островов ось жеблов явно никак не выражена в сейсмичности и не ограничивает ее.

Результаты нашей работы о форме и толщине сейсмоактивного объема у берегов Камчатки следует сопоставить с выводами работы П.И. Токарева [3]. В этой работе дается оценка толщины слоя в 70 км в среднем и 150 км максимально. Наши оценки гораздо меньше оценок П.И. Токарева из-за 1) методических расхождений – отказа от оценок толщины на глубинах меньше 100 км, где слоя как такового уже нет; 2) получения П.И. Токаревым не оценки толщины слоя, а оценки отклонений от конической поверхности, к которой он приблизил весь сейсмоактивный блок Курило-Камчатской дуги в целом; 3) получения П.И. Токаревым оценок при использовании малоточных определений положений гипоцентров прошлых лет.

Детальные наблюдения для Южных Курил [2] дают оценку максимальной толщины блока в 50 км, что даже меньше, чем аналогичная оценка в 80 км (по $K_0 = 9$), полученная нами.

Вышеизложенное позволило нам прийти к следующим выводам.

По землетрясениям с $K > 11$ за 1964-1972 гг. оконтурен сейсмоактивный объем у берегов Камчатки и Командорских островов, точность построений – 10-20 км. На глубинах до 70-100 км объем довольно широк и не может быть назван слоем. На глубинах больше 100 км сейсмоактивный объем имеет вид относительно тон-

кого слоя толщиной не более 15–25 км в среднем и до 40 км максимально. Вдоль дуги конфигурация объема неодинакова: угол падения северных разрезов (секторы 7–9) растет с глубиной до 60–90°; угол падения южных разрезов (секторы 10–12) меняется с глубиной: крутое падение вверху, выплаживание до 25–30° на глубине порядка 350 км, увеличение угла падения глубже 350 км. Западная граница сейсмоактивного объема более резкая и выдержанная вдоль дуги, чем восточная. Выделена тыловая граница сейсмоактивного объема. Сейсмоактивный объем в районе Командорских островов резко отличается от объема в районе Камчатки: он уже, почти симметричен и лишен землетрясений с глубинами более 50 км. В области стыка Курило–Камчатской и Алеутской дуг, примерно от п–ова Кроноцкого, сейсмоактивный объем расщепляется на две сейсмоактивные полосы: западную, уходящую в направлении на вулкан Шевелуч, и восточную, проходящую через п–ов Камчатский мыс вдоль континентального склона Берингова моря к о–ву Карагинскому.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федотов С.А. и др. Землетрясения Камчатки и Командорских островов. Статьи в ежегодниках: "Землетрясения в СССР". М., Наука, 1966–1973.
2. Федотов С.А., Багдасарова А.М., Кузин И.П., Тараканов Р.З. Землетрясения и глубинное строение юга Курильской островной дуги. М., "Наука", 1969.
3. Токарев П.И. О фокальном слое, сейсмичности и вулканизме Курило–Камчатской зоны. – "Изв. АН СССР, Физика Земли", 1970, № 3.
4. Гусев А.А. Ошибки определения параметров очага землетрясений Камчатки. – В кн.: Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск, "Наука", 1974.
5. Sykes L. R. Seismicity as a guide to global tectonic and earthquake prediction. – "Tectonophysics", 1972, v. 13, N 1–4.
6. Федотов С.А., Фарберов А.И. Об экранировании поперечных сейсмических волн и магматическом очаге в верхней мантии в районе Авачинской группы вулканов. – В кн.: Вулканизм и глубинное строение Земли, т. 3. М., "Наука", 1966.
7. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе. – В кн.: Сейсмическое районирование СССР. М., "Наука", 1968.
8. Федотов С.А., Шумилина Л.С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки. – "Изв. АН СССР, Физика Земли", 1971, № 9.
9. Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М. и др. Озерновское землетрясение и цунами 22/23 ноября 1969 г. – В кн.: Землетрясения в СССР в 1969 г. М., "Наука", 1973.
10. Barasangi M., Dorman O. World seismicity maps compiled from ESSA, Coast and Geodetic Survey epicenter data. 1961–1967. – "Bull. Seismol Soc. America", 1969, v. 59.