

С.А. Федотов, А.А. Гусев,
Г.В. Чернышева, Л.С. Шумилина

ЗОНА ВАДАТИ—ЗАВАРИЦКОГО—БЕНЬОФА НА КАМЧАТКЕ

Курило-Камчатская дуга — одна из типичных островных дуг. Ее отличает почти максимальный уровень сейсмичности (лишь на 20—30% ниже сейсмичности северо-восточной Японии), наиболее резкое пересечение глубоководных желобов (Курило-Камчатского и Алеутского) и мощный современный вулканизм. Это один из наиболее интересных районов для проверки гипотезы тектоники плит.

В настоящее время подробные, надежные и достаточно точные сведения о сейсмичности Камчатки дают детальные сейсмические наблюдения, проводимые здесь с октября 1962 г. ИФЗ АН СССР и ИВ ДВНЦ АН СССР, с 1972 г. ИВ ДВНЦ АН СССР [6, 7].

Среди первоочередных задач всего этого периода было изучение распределения очагов землетрясений в районе глубоководного желоба, в сейсмофокальном слое и под Камчаткой, свойств коры и верхней мантии, связи сейсмичности с вулканизмом и геодинамикой области.

К настоящему времени Камчатка является одной из тех областей мира, где получены наиболее подробные сейсмологические данные о зоне Беньофа наряду с такими, как Япония, некоторые районы Алеутских островов, Новая Зеландия, Курильские острова [1].

Камчатская региональная сеть сейсмических станций позволила получить в течение времени наблюдений однородные данные о землетрясениях. Число одновременно работающих станций — в среднем 15. Сеть обладает хорошей чувствительностью. В сейсмофокальном слое и на Камчатке регистрируются без пропусков землетрясения энергетического класса $K_{S1,2}^{\Phi 68} \geq 9$ ($M \sim 3$). Во всей области без пропусков регистрируются землетрясения $K_{S1,2}^{\Phi 68} \geq 10,5$ ($M \sim 4$). Энергетическая классификация камчатских землетрясений ведется по шкале энергетических классов С.А. Федотова $K_{S1,2}^{\Phi 68}$ [5]. Связь с общепринятой в СССР шкалой магнитуд M_{ECSN} выражается формулой $K_{S1,2}^{\Phi 68} = 1,5M + 4,6$, а с магнитудной шкалой сейсмологической службы США — $m_b - K_{S1,2}^{\Phi 68} = 2,0m_b + 2,1$.

К сожалению, неодинакова точность определения координат гипотенцентров в различных участках исследуемого региона. Для основной массы землетрясений точность определения координат очагов не менее 10—15 км. Ошибки определения глубины очагов из-за одностороннего расположения станций увеличиваются у северного и южного краев карты, а также в районе глубоководного желоба. За 1962—1981 гг. кам-

чатская сеть сейсмических станций определила координаты 39 тыс. землетрясений, опубликованные в ежегодниках "Землетрясения в СССР" [8].

Данные о размещении очагов землетрясений Камчатки рассматривались несколько раз по мере накопления материала [9, 10].

Разработка программы и применение ЭВМ дало возможность рассмотреть материал за весь 20-летний период наблюдений. Анализ и обобщение этого большого фактического материала позволяет показать наиболее полные, достоверные данные о размещении очагов в зоне Вадати—Заварицкого—Беньюфа на Камчатке, о форме, положении этой зоны, уровне сейсмичности вне и внутри нее, о ее связи с вулканизмом и тектоникой. Эти данные могут служить основой для проверки геодинамических гипотез.

На рис. 1 (см. вкл.) показана карта эпицентров камчатских землетрясений $K_{51,2}^{\Phi 68} \geq 12$ за период 1962—1982 гг. Размеры кружков, оконтуривающих эпицентры, отображают в масштабе карты их действительную величину. Оценка среднего радиуса очага сделана по среднемировой зависимости между магнитудой (классом) и радиусом, полученной Ю.В. Ризниченко [2, с. 24]. Такое изображение эпицентров позволяет представить объем пространства, охваченный сейсмическим процессом за годы наблюдений.

Основная масса землетрясений, в том числе все наиболее сильные ($M \geq 7$), произошли у восточных берегов Камчатки. В этой части региона очаги охватывают земную кору и самые верхние слои мантии (глубины меньше 100 км). В более глубоких слоях мантии землетрясения происходят к западу от тихоокеанского побережья Камчатки как под самим полуостровом, так и под Охотским морем.

Более детальное представление о положении очагов дают послонные карты эпицентров, построенные для срезов 0—50, 51—100, 101—150, 151—200, 201—250 км. По ним ясно видно, что наиболее сейсмична фокальная зона на глубинах 0—50 км. Здесь сейсмический процесс охватывает пространство от восточного вулканического пояса Камчатки до глубоководного желоба. Ширина зоны примерно 200—250 км. Полоса максимальной сейсмичности протягивается по оконечностям полуостровов на восточном побережье Камчатки. У п-ова Камчатский мыс зона раздваивается: одно направление продолжается на север к Карагинскому полуострову, другое — поворачивает на восток к Алеутской дуге. На собственно п-ове Камчатка происходят отдельные землетрясения, в некоторых местах выделяются небольшие скопления эпицентров (например, в районе пос. Эссо), связанные с тектоническими структурами меньшего по сравнению с фокальной зоной ранга. Подобная сейсмичность в данной статье не обсуждается.

На глубинах 51—100 км сейсмичность значительно ослабевает, зона существенно сужается (~75 км), линия максимальной сейсмичности перемещается примерно на 40 км к западу, протягиваясь по основаниям восточных полуостровов. На север от п-ова Камчатский мыс сейсмичность отсутствует. Поворот сейсмичной зоны на Алеутские острова проявлен очень слабо. Зато поворот фокальной зоны от Кроноцкого полуострова на 40° к северу, в направлении вулкана Шивелуч, прослеживается отчетливо. Западная граница фокальной зоны

проходит по восточному вулканическому поясу. Далее на запад под собственно п-овом Камчатка эпицентры практически отсутствуют, за исключением некоторого числа землетрясений в районе Ключевской группы вулканов и Шапинского грабена.

На глубинах 101—150 км число землетрясений меньше, фокальная зона еще более узкая (~50 км), линия максимальной сейсмичности подвинута далее на запад. Западная граница практически совпадает с восточным вулканическим поясом. Поворот фокальной зоны на север от Кроноцкого полуострова четко прослеживается. К востоку и западу от фокальной зоны сейсмический процесс отсутствует. Алеутское направление не прослеживается вовсе.

На глубинах 151—200 км эпицентры еще более малочисленны, фокальная зона по-прежнему узка (~50 км), подвинута на запад, за восточный вулканический пояс. Вне ее эпицентры отсутствуют. Поворот на Шивелуч по-прежнему четок.

На глубинах 201—250 км с фокальной зоной связаны лишь отдельные землетрясения. Эпицентры еще дальше отодвинуты на запад. Фокальная зона на севере обрывается у Ключевской группы вулканов. Появляются землетрясения под Охотским морем. Вне фокальной зоны землетрясения по-прежнему отсутствуют.

Продольные разрезы фокальной зоны также четко демонстрируют максимальный уровень сейсмичности в слое 0—40 км полуостровов восточной части Камчатки, уменьшение уровня сейсмичности в целом и перемещение максимума сейсмичности на большие глубины при движении на запад. Сейсмичность на севере у Кроноцкого полуострова проявляется на меньших глубинах ($H < 100$ км), чем на юге у мыса Лопатка ($H \sim 200$ км).

В слое 0—40 км, т.е. в земной коре, выделяются два относительно асейсмичных участка: отчетливый в районе мыса Шилунский и менее четкий — в южной части Кроноцкого полуострова.

На рис. 2 представлено распределение числа землетрясений по глубине. Чтобы избежать влияния неполноты данных, графики построены для трех уровней энергетических классов. При построении до 200 км использован шаг в 10 км по глубине, глубже шаг равен 20 км. Показаны глубины проекций вулканов на среднюю плоскость фокальной зоны.

Графики рис. 2 наиболее отчетливо показывают, что большинство землетрясений Камчатки происходит на глубинах 0—40 км. На глубине 40—50 км число землетрясений резко убывает в 10 раз, затем постепенно уменьшается еще в 30 раз до глубины 220 км. На глубинах 220—320 км убывание количества очагов с глубиной уменьшается. Существуют минимумы на глубинах 320—360 км, увеличение числа землетрясений на глубине 400 км, максимум на глубине 440—460 км. Самые глубокие землетрясения под Южной Камчаткой происходят на глубинах около 550 км.

Графики изменения числа землетрясений с глубиной для других островных дуг мира имеют похожую форму [18].

Примечательно, что действующие вулканы Камчатки проектируются на те глубины (100—200 км), где число землетрясений в фокальном

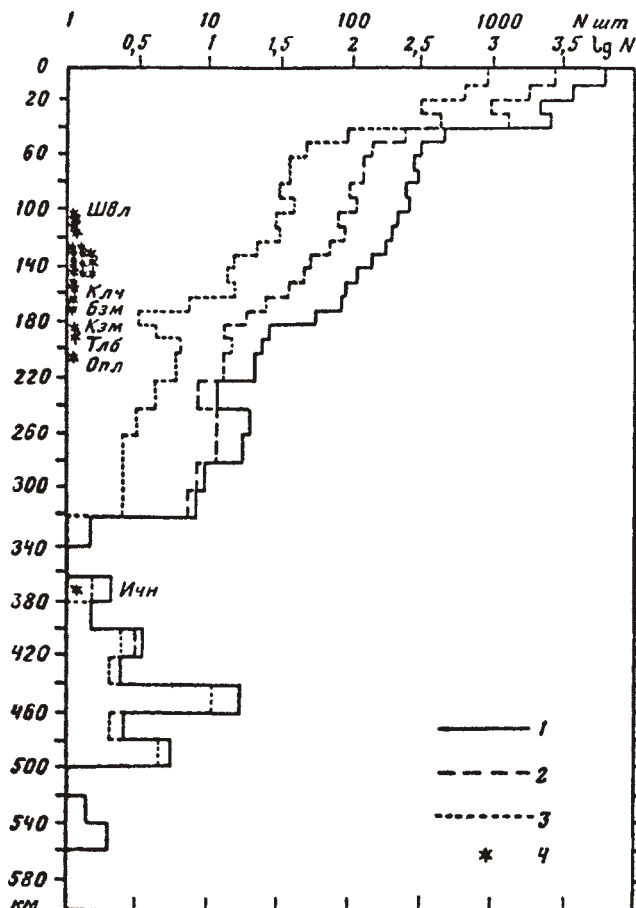


Рис. 2. Распределение землетрясений по глубине

1 — $K_{S1.2}^{\Phi 68} \geq 8.5 (m_b \geq 3.1)$; 2 — $K_{S1.2}^{\Phi 68} \geq 9.5 (m_b \geq 3.6)$; 3 — $K_{S1.2}^{\Phi 68} \geq 10.5 (m_b \geq 4.1)$; 4 — положение проекций вулканов на медиану фокальной зоны. Буквенные обозначения см. на рис. 1

слое убывает быстрее всего. Непосредственно под этим интервалом глубин находится глобальная сейсмическая граница (220 км), к которой приурочены фазовые переходы вещества мантии [15 и др.]. Вероятно, что сложный ход графика числа землетрясений на больших глубинах также связан с фазовыми переходами. Эта проблема еще мало изучена.

Далее приводятся более подробные данные о распределении очагов землетрясений в верхней части фокального слоя. В центре региона большое число станций и их более благоприятное расположение по отношению к очагам обеспечили точность определения координат эпицентров и глубин выше средней. Это дало возможность для этого участка фокальной зоны построить поперечные

вертикальные разрезы крупного масштаба, позволяющие анализировать детали ее внутреннего строения.

На разрезах через Авачинский залив отчетливо видно, что область максимальной сейсмичности — глубины 0—40 км. Наиболее сейсмичная полоса на этих глубинах погружается от желоба в сторону континента и смыкается с наклонной частью фокального слоя на глубинах 40—50 км.

На глубинах 50—150 км обнаруживается явная тенденция к двухслойному расположению очагов. Размер практически асейсмичной области между активными слоями превышает погрешность определения положения очагов. Аналогичная особенность в строении фокальной зоны впервые была отмечена для Японской дуги по данным о микроземлетрясениях [11—14, 16, 17].

Наличие каталога камчатских землетрясений на 20-летний срок детальных сейсмологических наблюдений в регионе (1962—1981 гг.) и применение ЭВМ для графического построения дало возможность по всему имеющемуся материалу (39000 событий) составить детальное представление о форме фокальной зоны у берегов Камчатки и размещении очагов землетрясений в ней.

Сейсмичность фокальной зоны максимальна на глубинах 0—40 км. Эта часть фокальной зоны широка, протягивается примерно на 250 км, от восточных берегов Камчатки до Курило-Камчатского глубоководного желоба. Глубже сейсмичность ослабевает. Фокальная зона сужается до слоя шириной в среднем 40 км (максимально 50 км). Слой падает под континент под постоянным углом в 50°. Линия максимальной сейсмичности проходит по окончаниям полуостровов восточного побережья Камчатки. К западу от этой линии сейсмичность уменьшается резче, чем к востоку. Фокальная зона однородна по форме и строению вдоль Камчатки на протяжении примерно 700 км, от мыса Лопатка на юге до Камчатского залива на севере. В Камчатском заливе, в месте сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг, на глубинах 50—200 км простирается фокальной зоны резко изменяется. Она поворачивает на 40° к северу и затем выклинивается.

В центральной части исследуемого региона материал позволил проследить двухслойное строение фокальной зоны на глубинах 50—150 км. Эта особенность зоны отмечалась исследователями Японской и Алеутской островных дуг. Для Камчатки она не столь отчетлива.

Рассмотренный материал дает новое подтверждение тому, что размещение вулканов связано с процессами, происходящими в сейсмофокальном слое или на его верхней границе [3, 4]. Простирается фокальной зоны параллельно вулканическому поясу. Западная граница фокального слоя на глубинах 50—150 км не пересекает вулканический пояс. Верхняя мантия на глубинах 20—100 км под вулканами почти асейсмична. Проекция вулканов на фокальную зону попадают в область глубин, где число землетрясений резко убывает, при этом проекция андезитовых вулканов попадают на меньшие глубины по сравнению с проекциями базальтовых.

Л и т е р а т у р а

1. *Балеста С.Т.* Земная кора и магматическое очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 134 с.
2. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9—27.
3. *Токарев П.И.* О связи вулканической и сейсмической активности в Курило-Камчатской зоне // Вулканизм Камчатки и Курильских островов. М., 1959. С: 156—182. (Тр. Лаб. вулканологии АН СССР; Вып. 17).
4. *Токарев П.И.* О фокальном слое, сейсмичности и вулканизме Курило-Камчатской зоны // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. N 3. С. 15—30.
5. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 115 с.
6. *Федотов С.А., Богдасарова А.М., Бобков М.Ф., Кузин И.П.* Землетрясения Камчатки и Командорских островов по данным детальных сейсмологических наблюдений за период 1961—1963 гг. // Землетрясения в СССР в 1963 г.: Ежегодник. М.: Наука, 1966. С. 120—125.
7. *Федотов С.А., Кузин И.П., Бобков М.Ф.* Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961—1962 гг. // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. N 9. С. 1360—1375.
8. *Федотов С.А.* и др. Землетрясения Камчатки и Командорских островов. // Землетрясения в СССР: Ежегодник [за 1964—1981 гг.]. М.: Наука, 1966—1983.
9. *Федотов С.А., Токарев П.И., Годзиловская А.А., Зобин В.М.* Детальные данные о сейсмичности Камчатки и Командорских островов 1965—1968 гг. // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 35—45.
10. *Федотов С.А., Токарев П.И., Кондратенко А.М., Феофилактов В.Д.* Сейсмичность Камчатки и области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг в 1969—1972 гг. // Вулканизм островных дуг. М.: Наука, 1977. С. 7—13.
11. *Хасегава А., Умино Н., Такаги А.* Двухплоскостная структура глубинной сейсмической зоны в северо-восточной части Японской дуги // III Сов.-яп. симпоз. по геодинамике и вулканизму зоны перехода от Азиат. континента к Тихому океану. Г. Южно-Сахалинск, 2—7 октября 1976 г. Новоалександровск, 1976. С. 17—18. (Тез. докл.; Вып. 1).
12. *Хасегава А., Умино Г., Такаги А.* Двухслойная структура глубинной сейсмической зоны островной дуги северо-восточной Японии // Новые данные о строении коры и верхней мантии Курило-Камчатского и Японского регионов: (По материалам III Сов.-яп. симпоз. по геодинамике и вулканизму). Владивосток, 1978. С. 68—75.
13. *Engdahl E.R.* Relocations of intermediate depth earthquakes in the Central Aleutians by seismic-ray tracing // Nature. 1973. Vol. 245. P. 23—25.
14. *Hasegawa A., Umino N., Takagi A.* Double-planed structure of the deep seismic zone in the North-Eastern Japan Arc // Tectonophysics. 1978. Vol. 47, N 1/2. P. 43—58.
15. *Maxwell J.C.* What in the lithosphere? // Eos. 1984. Vol. 65, N 17. P. 321—325.
16. *Suzuki S., Sasatani T., Motoya Y.* Double seismic zone beneath middle of Hokkaido, Japan, in the southwestern side of the Kurile Arc // Tectonophysics. 1983. Vol. 96. N 1/2. P. 59—76.
17. *Tsumura K.* Microearthquake activity in the Kanto district // Publications for the 50th anniversary of the Great Kanto earthquake (1923). 1973. P. 67—87.
18. *Vassilion M.S., Hager B.H., Raefsky A.* The distribution of earthquakes with depth and strees in subducting slabs // J. Geodyn. 1984. Vol. 1, N 1. P. 11—28.