

31. КАМЧАТКА И КОМАНДОРСКИЕ ОСТРОВА

31. 1. Геолого-тектонические условия высокой сейсмичности Камчатки

Со времени составления предыдущей карты районирования геолого-тектонические представления о природе землетрясений Камчатки и Командор практи-

чески не изменились, поэтому мы не будем на них подробно останавливаться. Напомню только об основных геологических условиях высокой сейсмичности района [221, с. 412—413].

Основная масса камчатских землетрясений возникает в области сочленения Азиатского материка с

океанической платформой Тихого океана [51, 285, 239]. Они концентрируются в виде полосы, которая совпадает в целом с континентальным склоном Камчатки. Этот склон представляет сложно построенную зону нарушений, состоящую из относительно поднятых и опущенных участков, осложненных разломами северо-восточного простирания. Здесь возникает основная масса землетрясений в коре.

В 1969 г. произошло землетрясение с $M = 7,7$ около п-ова Озерного в Беринговом море [800]. Землетрясение сопровождалось многочисленными, хотя и несильными афтершоками. Оно явилось сильнейшим землетрясением столетия в западной части Берингова моря, которое показало, что на продолжении Курило-Камчатского пояса землетрясений в Беринговом море возможны землетрясения с магнитудой около 8. Пока трудно оценить повторяемость таких землетрясений в этом районе.

Основная масса землетрясений Камчатки происходит как следствие сложных относительных перемещений материка и платформы Тихого океана.

В полосе повышенной сейсмической активности существуют локальные максимумы, пространственно связанные с полуостровами Камчатского мыса, Кроноцким, Шипунским. Они являются местами стущения слабых и умеренных по силе землетрясений, вызванных современными контрастными движениями на границах этих поднятых участков океанского побережья Камчатки с разделяющими их участками поперечных прогибаний (области очагов сильнейших землетрясений с $M > 8$, которые порождаются движениями в более крупной структуре — фокальном слое, могут покрывать несколько таких участков и, по-видимому, мало связаны с локальными максимумами сейсмичности в фокальном слое).

К западу от основной полосы камчатских землетрясений современные движения менее интенсивны, чем по Тихоокеанскому побережью Камчатки. Из-за высокой тектонической подвижности Восточной и Центральной Камчатки на новейшем этапе сильные неглубокие землетрясения с $M > 6$ возможны и на этих территориях. Вероятность их возникновения здесь значительно меньше, чем по Тихоокеанскому побережью Камчатки.

Мала вероятность возникновения сильных землетрясений на западе Камчатки, где в течение всего мезозойско-кайнозойского этапа подвижность была в 2—3 раза ниже подвижности Восточной и Центральной Камчатки.

Наиболее полная и новая сводка о новейшей тектонике Камчатки и Командорских островов содержится в книге И. В. Мелекесцева и др. [457]. Рассмотрим некоторые результаты этой работы, имеющие наибольшее отношение к сейсмическому районированию.

Оценены средние амплитуды и скорости тектонических движений новейшего времени (для последних трехсот тысяч лет) для большей части Камчатки и Командорских островов, в том числе для наиболее сейсмического восточного побережья Камчатки. Оценки сделаны по амплитудам перемещения кровли дислоцированных отложений (кавранских и более древних) и по положению тылового шва морских террас (эвстатические колебания уровня океана были учтены). Эти способы могли использоваться по всей Восточной Камчатке, кроме ее вулканических областей — Восточного вулканического пояса Камчатки. Остальная часть Восточной Камчатки, судя по приведенным в

работе [457] оценкам, поднималась в течение последних трехсот тысяч лет. Средние скорости поднятия океанского побережья Камчатки от мыса Лопатка на южной оконечности Камчатки до п-ова Шипунский почти одинаковы и равны 1,6—1,7 мм/год. Севернее п-ова Шипунский новейшие поднятия океанского побережья Камчатки имеют более сложный и дифференцированный характер. Величина и скорость поднятия максимальны на полуостровах Кроноцком и Камчатском (Камчатского мыса), где они достигают суммарно 1500—1600 м и 4,7—5,0 мм/год соответственно. В разных местах побережья Камчатского залива, расположенного между названными полуостровами, средние скорости новейших поднятий меняются от 1,1 до 3,7 мм/год.

Наиболее интенсивные контрастные новейшие движения в глубинной части Камчатки происходят вдоль разломов, ограничивающих восточный борт депрессии долины р. Камчатки и ее западный борт в узкой части депрессии.

Из этих данных следует несколько выводов, касающихся сейсмического районирования.

Опасность сильнейших землетрясений ($M > 7\frac{3}{4}$) примерно одинакова для всего восточного побережья Камчатки от п-ова Камчатского (Камчатского мыса) до мыса Лопатка.

Сейсмичность всего юго-восточного побережья Камчатки от п-ова Шипунский до мыса Лопатка должна быть примерно одинакова. Относительное сейсмическое затишье, наблюдавшееся в последнее десятилетие на участке побережья, расположенном между Петровавловским-Камчатским и мысом Лопатка, можно расценивать как временное явление (то же самое следует из инструментальных данных о землетрясениях Камчатки за 1904—1961 гг. [799]).

Можно ожидать, что южный берег п-ова Камчатского (Камчатского мыса) и северный и южный берега Кроноцкого полуострова, где новейшие контрастные вертикальные движения достигают максимальных величин, являются местами с наиболее высокой частотой возникновения землетрясений ($M \sim 6 \div 7$). Представляется, что длина разломов, обрамляющих эти полуострова, мала для того, чтобы порождать землетрясения с $M \geqslant 7\frac{1}{2}$.

В пределах самой Камчатки наиболее опасными могут быть новейшие разломы, отделяющие опускающуюся депрессию долины р. Камчатки от окружающих ее горных хребтов.

Резюмируя все изложенное выше можно сказать, что на Камчатке выделяются три зоны различной тектонической подвижности, а следовательно, и сейсмической активности: 1) наиболее сейсмичная область занимает континентальный склон Камчатки и Командорских островов; 2) менее активная зона охватывает Восточную и Центральную Камчатку; 3) относительно спокойная включает Западную Камчатку. Восточная граница последней проходит по восточному склону Срединного хребта.

Определенную сейсмическую опасность представляют и землетрясения, связанные с деятельностью камчатских вулканов. Их извержения предваряются и сопровождаются умеренными по силе землетрясениями.

Наиболее сильное инструментально записанное землетрясение из числа тех, которые явно связаны с вулканической деятельностью, наблюдалось при извержении вулкана Шивелуч в 1964 г. ($M = 5,5$).

Близость очагов вулканических землетрясений к поверхности ($h = 0 \div 5$ км) приводит к значительным сотрясениям в эпицентре. В 1928 г. в районе вулкана Кизимен охотники были свидетелями землетрясения, описания которого соответствуют интенсивности в 9 баллов.

В 1923 г. в 5 км от подножия вулкана Ильинский интенсивность сотрясений достигла 8 баллов.

Ближайшими к активным вулканам большими населенными пунктами на Камчатке являются г. Петропавловск-Камчатский и пос. Ключи. В Петропавловске-Камчатском наблюдались сотрясения в 6—7 баллов (1827 г.) при извержении Авачинской сопки (25 км от кратера вулкана). В пос. Ключи при извержении Ключевской сопки (1909, 1931 гг.) сотрясения достигли 7 баллов (35 км от кратера вулкана). Это наиболее сильные из известных сотрясений, вызванных деятельностью вулканов. Кроме того, работа вулканов сопровождается многочисленными сотрясениями интенсивностью 3—5 баллов, часто продолжающимися в течение нескольких дней.

31. 2. Сейсмичность

Камчатская земля с XVII в. известна как край огнедышащих гор и сильных «трясений земли». Первые исследователи Камчатки — выдающиеся ученые С. П. Крашенинников, Г. В. Стеллер и др. [379, 931] — оставили подробные описания сильных землетрясений, свидетелями которых они были сами и о которых узнали из рассказов очевидцев. Довольно полная сводка сведений о сильных камчатских землетрясениях для периода доинструментальных наблюдений содержится в каталоге И. В. Мушкетова и А. П. Орлова [500]. С развитием сети инструментальных наблюдений (с 1897 г.) появились различные каталоги, содержащие сведения о сейсмических событиях [51, 118, 350, 799, 887, 900, 901]. Используя все доступные источники, С. А. Федотов и Ф. А. Кириллов в 1968 г. составили сводный каталог сильных и ощутимых землетрясений Камчатки и Командорских островов с 1698 по 1961 г. Сводка сведений о землетрясениях Камчатки содержится также в каталоге, составленном С. Л. Соловьевым и Ч. М. Го [736].

Данные о землетрясениях Камчатки с 1961 г., т. е. с момента организации местной сети станций, публикуются в ежегодниках «Землетрясения в СССР». Кроме того, они содержатся в двух сводных работах [801, 802].

Каталоги землетрясений разных лет, составленные по данным инструментальных наблюдений, сильно отличаются по полноте данных и точности определения координат очагов. С 1896 по 1923 г. регистрировались без пропусков лишь землетрясения с $M \geq 7$; с 1924 г.— с $M \geq 6$; в 1957—1961 гг.— с $M \geq 5$; с ноября 1961 г., со времени развертывания местной сети сейсмических станций, представительными становятся землетрясения с $M = 3$ ($M_{\text{атл}} \sim 2,5 \div 2,75$).

По всем перечисленным выше источникам нами составлен каталог сильных ($M \geq 6$) землетрясений Камчатки с описанием, где возможно, макросейсмического эффекта [805]. В каталоге приведены все основные параметры каждого землетрясения (t_0 , ϕ , λ , n , M , I_0). В том случае, когда какой-либо параметр отсутствовал в исходном каталоге, он восстанавливался по макросейсмическим данным и известным другим параметрам по методике Н. В. Шебалина [840].

Для наиболее сильных и характерных землетрясений, кроме основных данных, приведены подробные описания проявлений их на суше и на море.

Размещение очагов землетрясений в пространстве, очаговые зоны. На рис. 31.1 дана карта эпицентров землетрясений, содержащихся в каталоге. В больших деталях картину сейсмичности Камчатки и Командорских островов отражает рис. 31.2, на котором показаны эпицентры всех землетрясений с $M \geq 4$ ($K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 11$)¹ по данным детальных наблюдений за 1964—1973 гг.

На рис. 31.3 помещена карта активности A_{10} для слоя 0—100 км по землетрясениям, зарегистрированным за тот же период времени. Карта активности построена методом постоянной детальности [614]; площадка осреднения — эллипса с осями 150 и 75 км, шаг при построении карты — 25 км, рои и афтершоки исключены, они составили 32% от общего числа землетрясений. Минимальный энергетический класс землетрясений, по которому велся счет активности, — $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 8,5$ ($M \approx 2,5$). Для удобства сопоставления этой карты с аналогичными картами для других регионов оцифровка изолиний дана в числах землетрясений 10-го класса по шкале Т. Г. Раутиан. Карта активности дополняет картину сейсмичности. Иным способом трудно отразить на одной карте все зарегистрированные землетрясения, начиная с минимального по энергии представительного землетрясения ($K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} \geq 9$; $K^P \geq 9,3$; $M \geq 3$). Для Камчатки за период 1964—1973 гг. зарегистрировано свыше 600 тыс. таких землетрясений.

Подавляющее большинство эпицентров землетрясений располагается у восточного побережья Камчатки, захватывая оконечности полуостровов. От п-ова Камчатский мыс происходит поворот эпицентральной зоны к Командорским островам. Плотность эпицентров вдоль этой полосы наибольшая. Она показывает место выхода фокального слоя на дно океана.

На самой Камчатке землетрясений значительно меньше, а за глубоководным желобом они очень редки.

Сейсмическая активность (рис. 31.2) Восточной Камчатки на порядок ниже сейсмической активности в океане у берегов Камчатки. Центральная Камчатка на два порядка спокойнее, Западная Камчатка практически асейсмична.

Глубины очагов изменяются от 0 до 600 км, но основная масса землетрясений сосредоточена в слое 0—100 км (90%), слой 0—50 км содержит 80% очагов (рис. 31.4).

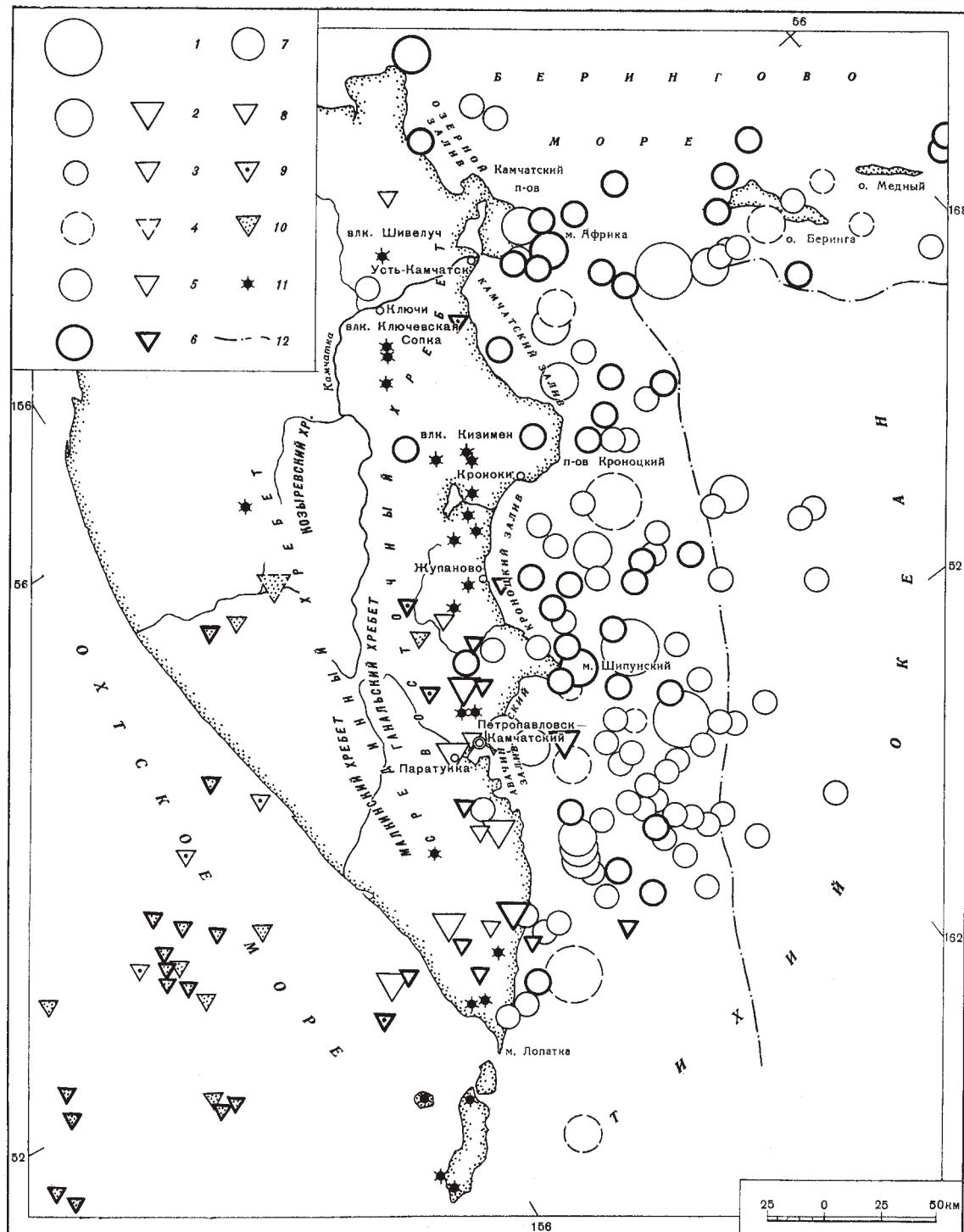
Очаги землетрясений уходят вглубь по мере удаления на запад от места выхода фокального слоя на дно океана.

Сейсмичность Камчатки теснейшим образом связана с глубинным живущим разломом между континентальным и океаническим блоками земной коры и

¹ Энергия камчатских землетрясений оценивается по энергетической классификации С. А. Федотова [797] — $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68}$. Формулы связи этой классификации с энергетической классификацией Т. Г. Раутиан — K^P и с магнитудной шкалой — $M_{\text{ЕССН}}$ — следующие:

$$K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 0,84K^P + 1,27;$$

$$K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 1,5M_{\text{ЕССН}} + 4,6.$$



31.1. Карта эпицентров землетрясений Камчатки и прилегающих акваторий с $M \geq 6$, с 1737 по 1972 гг.

1 — $M \geq 8,1$; 2 — $M = 7,1 - 8$; 3 — $M = 6,1 - 7$; 4 — время возникновения землетрясения до 1900 г.; 5 — до 1956 г.; 6 — после 1956 г.; 7 — глубина очага, $h \leq 70$; 8 — $150 \geq h \geq 70$; 9 — $300 \geq h \geq 150$; 10 — $h > 300$ км; 11 — вулканы; 12 — ось глубоководного Курило-Камчатского желоба

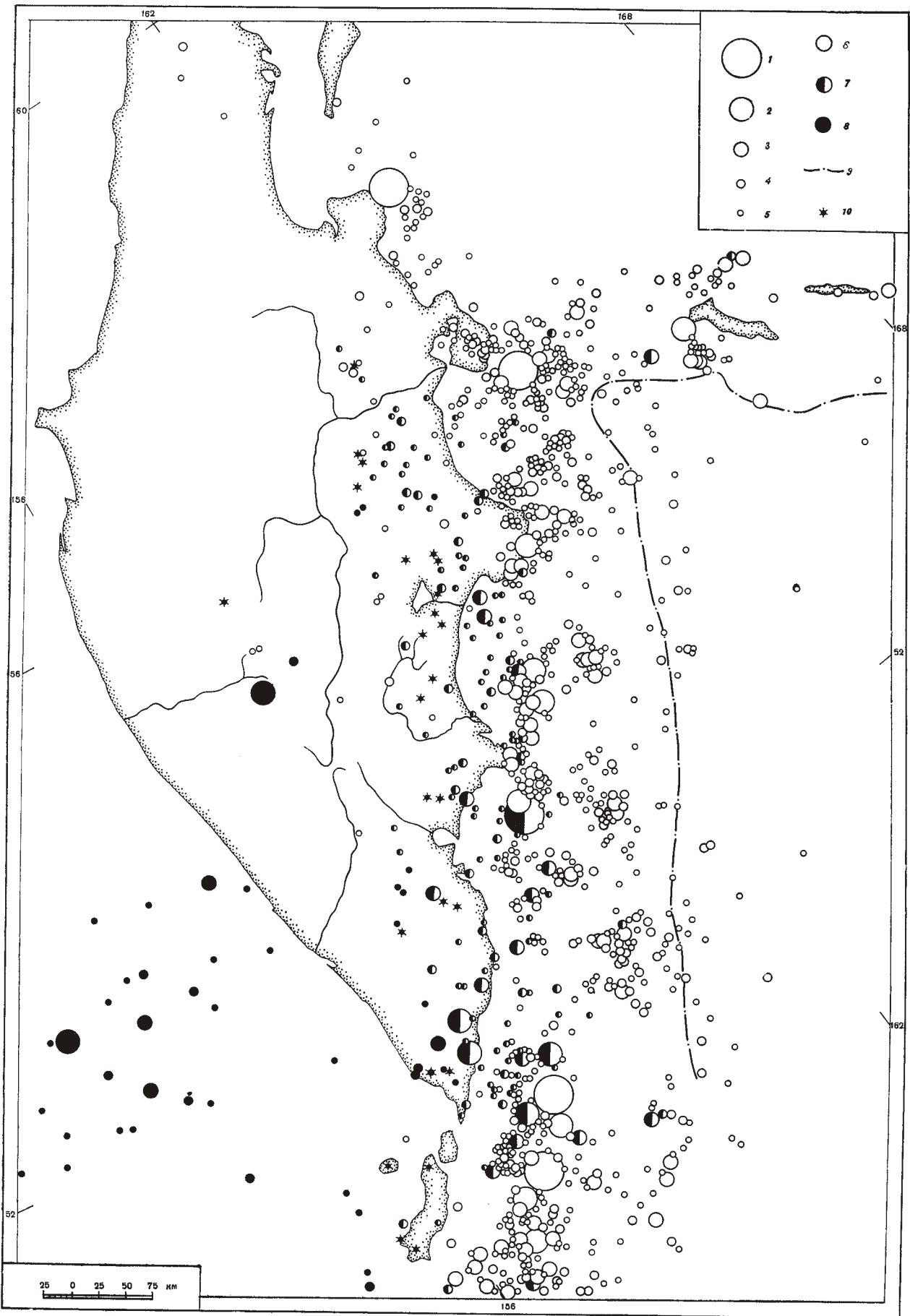
мантии¹. По разлому происходит относительное перемещение этих блоков, которое и определяет высокую сейсмичность континентального склона окружающих Тихий океан материков и островов. На самом п-ве Камчатка сейсмичность определяется в ос-

¹ Вряд ли правильно говорить здесь об одном разломе. Лучше использовать термины «зона разлома», «шовная зона», «система разломов» и т. п. (Прим. ред.).

новном неглубокими (0—50 км) землетрясениями, связанными с более мелкими структурами: разломами, обрамляющими депрессию р. Камчатки, Козыревско-Быстрынским сводом и т. п.

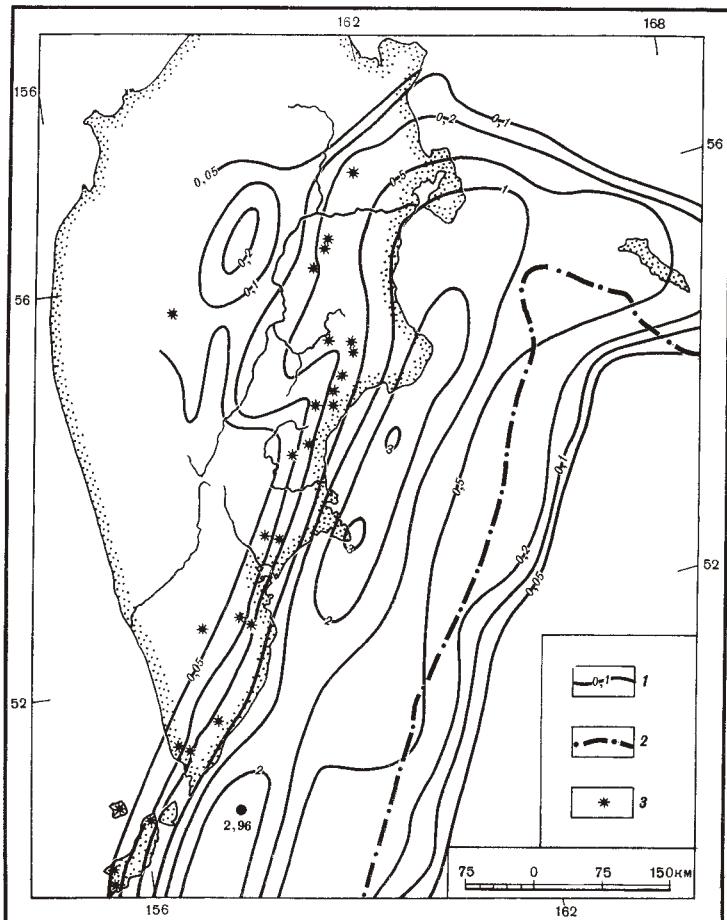
По накопленным за 10 лет (1964—1973 гг.) данным детальных наблюдений был оконтурен сейсмогенный объем — фокальная зона [239]. Для этого были построены через 100 км разрезы вкрест фокальной зоны. Фокальная зона оконтурена по землетрясениям с энергетическим классом $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} \geq 11$ ($\sim M = 4$; $\sim m_b \simeq m_{PV} = 4,5$) (см. рис. 31.2). По совокупности разрезов построено пространственное изображение фокальной зоны и проведены ее границы в плане.

Надежность таких детальных построений обеспечена высокой точностью определения координат



31.2. Карта эпицентров землетрясений с $K_{S_{1,2}} \geq 11$ ($M \approx 4$), 1964—1973 гг.

$1-5$ — энергия землетрясений: 1 — $M \geq 7$; 2 — $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 14,3 - K_{S_{1,2}}^{\Phi 69} =$
 $= 13$, 4 — $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 12$; 5 — $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 11$; 6 — 8 — глубина очагов;
 6 — 0—50, 7 — 51—200, 8 — ≥ 200 км; 9 — ось глубоководного Курило-Камчатского желоба; 10 — вулканы



31.3. Карта сейсмической активности A_{10}

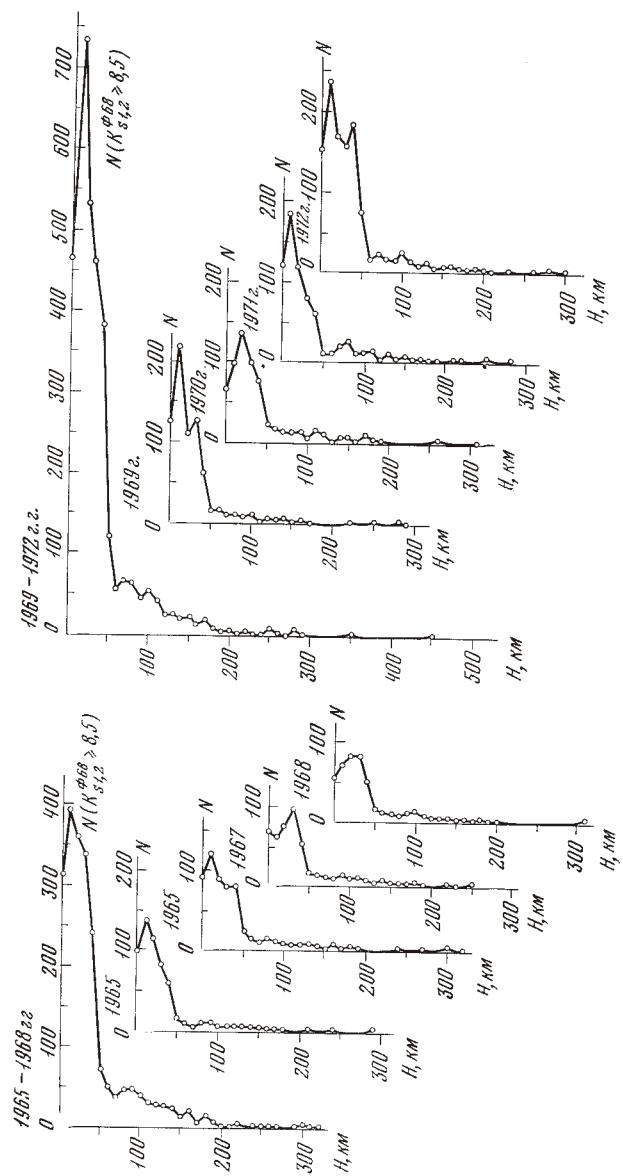
1 — изолинии A_{10} ; 2 — ось глубоководного желоба; 3 — вулканы

31.4. Распределение по глубине землетрясений в контуре надежной регистрации землетрясений $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} \geq 8,5$

± 10 км в среднем) и регистрацией без пропусков землетрясений с $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} \geq 11$.

Оказалось, что фокальная зона — тело довольно сложной формы, широкое наверху, сужающееся книзу и уходящее под изменяющимся углом под полуостров и бассейн Охотского моря. На глубинах 0—30 км землетрясения встречаются от Курило-Камчатского желоба до Западной Камчатки при наибольшей их плотности в месте выхода фокальной зоны на дно океана. Глубже, от 30 до 70 км, фокальный объем сужается от 200 до 15—25 км. Характерной чертой его является существование на западе четкой, почти вертикальной грани, идущей вдоль берега Камчатки. Она особенно четко прослеживается на глубинах до 90—110 км, здесь мы называли ее «тыловой границей». Эта граница расположена примерно одинаковым образом по отношению к оси пояса вулканов (на расстоянии 50 ± 10 км в плане) и имеет примерно одинаковую форму на всех разрезах. Она близвертикальна на глубинах до 60—70 км, а далее уходит под Камчатку под крутым углом.

На глубинах 30—70 км к западу от тыловой границы в полосе шириной 70—100 км есть редкие землетрясения с $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} \leq 10$. Далее к западу подкоровых



землетрясений не отмечено. Тем не менее резкость выделенной границы весьма велика. Очаговые зоны сильных ($M \sim 8$) поверхностных землетрясений располагаются почти вплотную к тыловой границе с востока, в то время как к западу от нее происходят лишь землетрясения с максимальной магнитудой $M \sim 3,5$. Плотность выделяемой сейсмической энергии изменяется на расстояниях в 30—50 км не менее чем на шесть порядков.

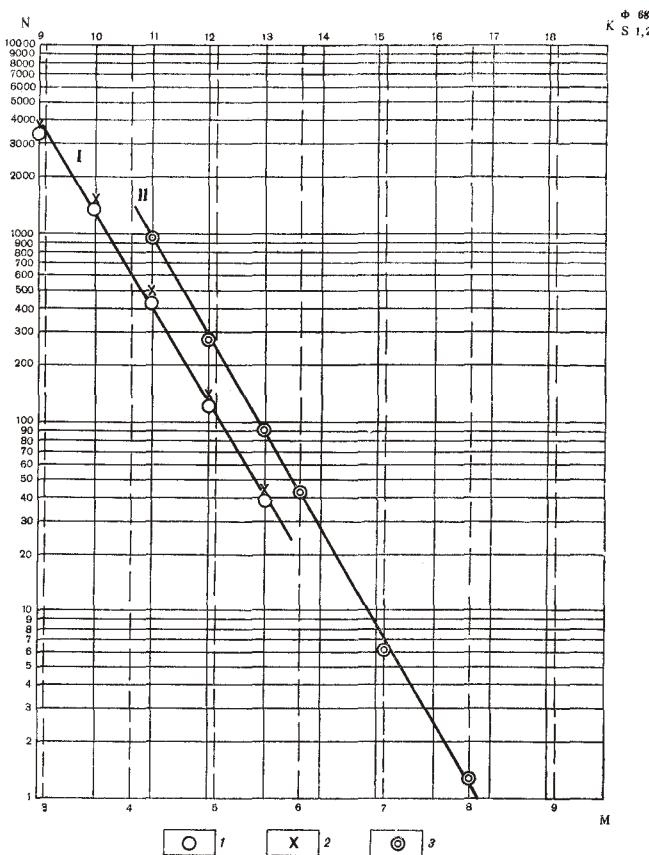
Экстраполяция тыловой границы вверх на глубине 0—30 км оправдана, так как и в верхнем слое $h = 0 \div 30$ км к западу от нее сейсмичность также резко падает, хотя здесь и наблюдаются редкие землетрясения магнитудой до 6,5 (например, землетрясение 1957 г.).

Выделенная тыловая граница фокальной зоны дает непосредственную оценку предельно близкого к суше расположения очагов сильнейших землетрясений, т. е. западную границу $K_{\max}^{\Phi 68} = 17$ ($K_{\max}^P = 19$; $M = 8,25$).

Повторяемость землетрясений во времени. Несмотря на то, что опасность возникновения землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ во всей высокосейсмичной области одинакова, вероятность во времени для каждого

Таблица 31.1

Повторяемость землетрясений Камчатки за 1964—1973 гг.
в контуре надежной регистрации землетрясений $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} \geq 8,5$;
 $M \sim 2,5$



31.5. График повторяемости землетрясений

1 — для землетрясений, зарегистрированных в 1964—1973 гг. в контуре надежной регистрации землетрясений $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} \geq 8,5$; 1 — глубина очагов $0—50$ км, $\gamma = 0,47 \pm 0,003$; 2 — глубина очагов $0—100$ км, $\gamma = 0,46 \pm 0,003$; 3 — по данным табл. 31.2 $\gamma = 0,52 \pm 0,006$

отдельного места оказывается различной. Оценить ее позволяет долгосрочный сейсмический прогноз, предложенный С. А. Федотовым [795, 796]. В этих работах на основе анализа всех имеющихся данных о сейсмичности Камчатки и Курильских островов был выделен сейсмический цикл, продолжающийся 140 ± 60 лет для каждого участка сейсмической зоны. Этот цикл делится на три этапа: I — период афтершоков после землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$; II — спокойный период (период накопления напряжений); III — стадия форшоков. Согласно долгосрочному прогнозу наиболее вероятными местами следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ у берегов Камчатки является сейчас юг Камчатского залива, Кроноцкий полуостров и район, расположенный юго-восточнее Кроноцкого полуострова.

Некоторое представление о повторяемости катастрофических землетрясений дают графики повторяемости землетрясений, если они достаточно надежны. Графики повторяемости для землетрясений Камчатки и Командорских островов строились многократно с использованием данных за различные периоды наблюдений. Наиболее надежными можно считать, вероятно, графики, построенные по материалам детальных сейсмических наблюдений за 1964—1973 гг. Данные о распределении землетрясений по энергетическим классам и величинах углового коэффициента графиков повторяемости за этот период сведены в табл. 31.1.

Год	Число землетрясений по классам $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68}$								Наклон тра- ектории повто- ряемости γ без афтер- шоков и роев
	9	10	11	12	13	14	15	16	

Слой 0—50 км									
1964	190	85	18	5	2	—	—	—	0,49
1965	287	141	50	10	5	1	—	—	0,43
1966	283	115	41	16	2	—	—	—	0,45
1967	215	98	35	11	1	—	—	—	0,44
1968	208	101	37	4	3	—	—	—	0,44
1969	430	172	35	12	5	—	—	—	0,50
1970	321	114	44	8	4	—	—	—	0,48
1971	379	115	61	23	2	—	1	—	0,45
1972	577	236	60	17	4	1	—	—	0,49
1973	445	156	45	13	10	1	—	—	0,48
1974—	3340	1332	426	119	38	3	1	—	0,468
1973									—

Слой 51—100 км									
1964	22	15	7	2	—	—	—	—	0,36
1965	26	8	5	—	—	—	—	—	0,50
1966	41	16	10	3	—	—	—	—	0,41
1967	42	21	5	3	1	—	—	—	0,42
1968	40	10	6	1	1	—	—	—	0,48
1969	34	13	7	3	1	—	—	—	0,39
1970	37	24	2	2	—	—	—	—	0,42
1971	53	12	12	1	—	—	1	—	0,45
1972	60	24	10	2	—	—	—	—	0,46
1973	38	17	4	2	—	—	—	—	0,52
1964—	393	160	65	19	5	—	1	—	0,44
1973									—

Слой 0—100 км									
1964	212	100	25	7	2	—	—	—	0,47
1965	317	149	55	10	5	1	—	—	0,43
1966	324	131	51	19	2	—	—	—	0,44
1967	257	119	40	14	2	—	—	—	0,45
1968	348	111	43	5	4	—	—	—	0,45
1969	464	185	42	15	6	—	—	—	0,49
1970	358	138	46	10	6	—	—	—	0,48
1971	432	127	73	24	2	—	2	—	0,45
1972	637	260	70	19	4	1	—	—	0,49
1973	483	172	44	15	10	1	—	—	0,49
1964—	3728	1492	491	138	43	3	2	—	0,46
1973									—

Слой 0—100 км; исключено 32% группирующихся землетрясений

1964—	2540	1018	322	104	43	3	2	—	0,46
1973									—

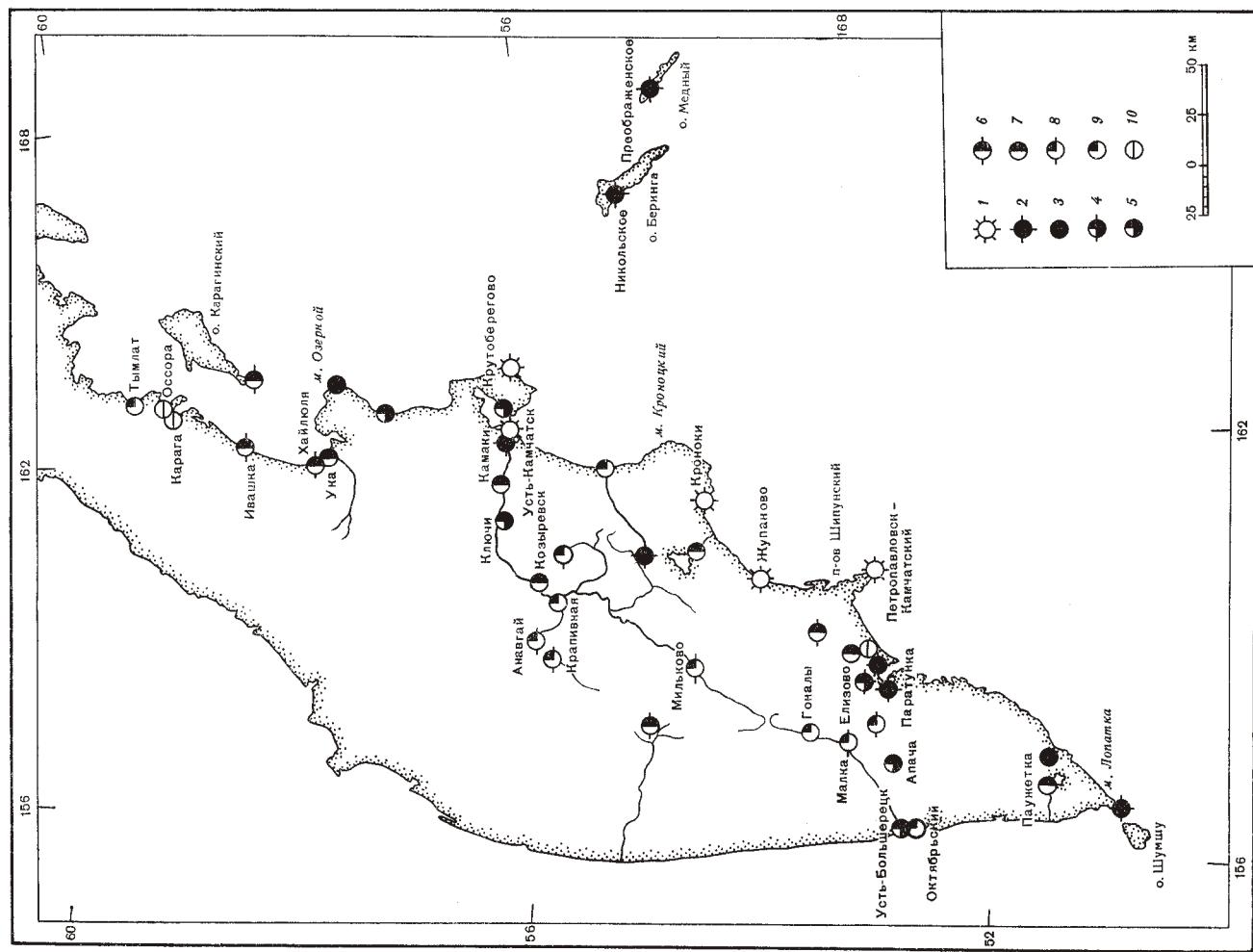
Повторяемость землетрясений в контуре надежной регистрации землетрясений $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} \geq 11$; $M \sim 4,25$; слой 0—50 км

1964—	—	—	876	252	78	12	5	—	0,56
1973									—

Повторяемость землетрясений в контуре надежной регистрации землетрясений с $K^P \geq 9$; слой 0—100 км

Год	Количество землетрясений по классам K^P								γ
	9	10	11	12	13	14	15	16	
1964—1973	7000	2300	870	230	130	47	18	2	0,45

В табл. 31.2 показано распределение камчатских землетрясений по магнитуде за все время инструментальных наблюдений.



31.7. Карта максимальных сотрясений в отдельных пунктах Камчатки

1—10 — интенсивность сотрясений: 1 — 1 > 9 баллов; 2 — 9, 3 — 8, 4 — 7—8, 5 — 7, 6 — 6—7, 7 — 6, 8 — 5—6, 9 — 5; 10 — 4—5 баллов

1—7 — зоны различной интенсивностью сотрясений; 1—9 баллов, 2 — 8, 3 — 7, 4 — 6, 5 — 5, 6 — 4, 7 — 3 балла, 8 — 16 — интенсивность в отдельных населенных пунктах; 8 — > 9 баллов, 9 — 9, 10 — 8, 11 — 7—8, 12 — 7, 13 — 7—6, 14 — 6, 15 — 5—6, 16 — 5 баллов; 17 — эпицентр с указанием даты, магнитуды и глубины очага землетрясения, изосейсты которого нанесены на карту

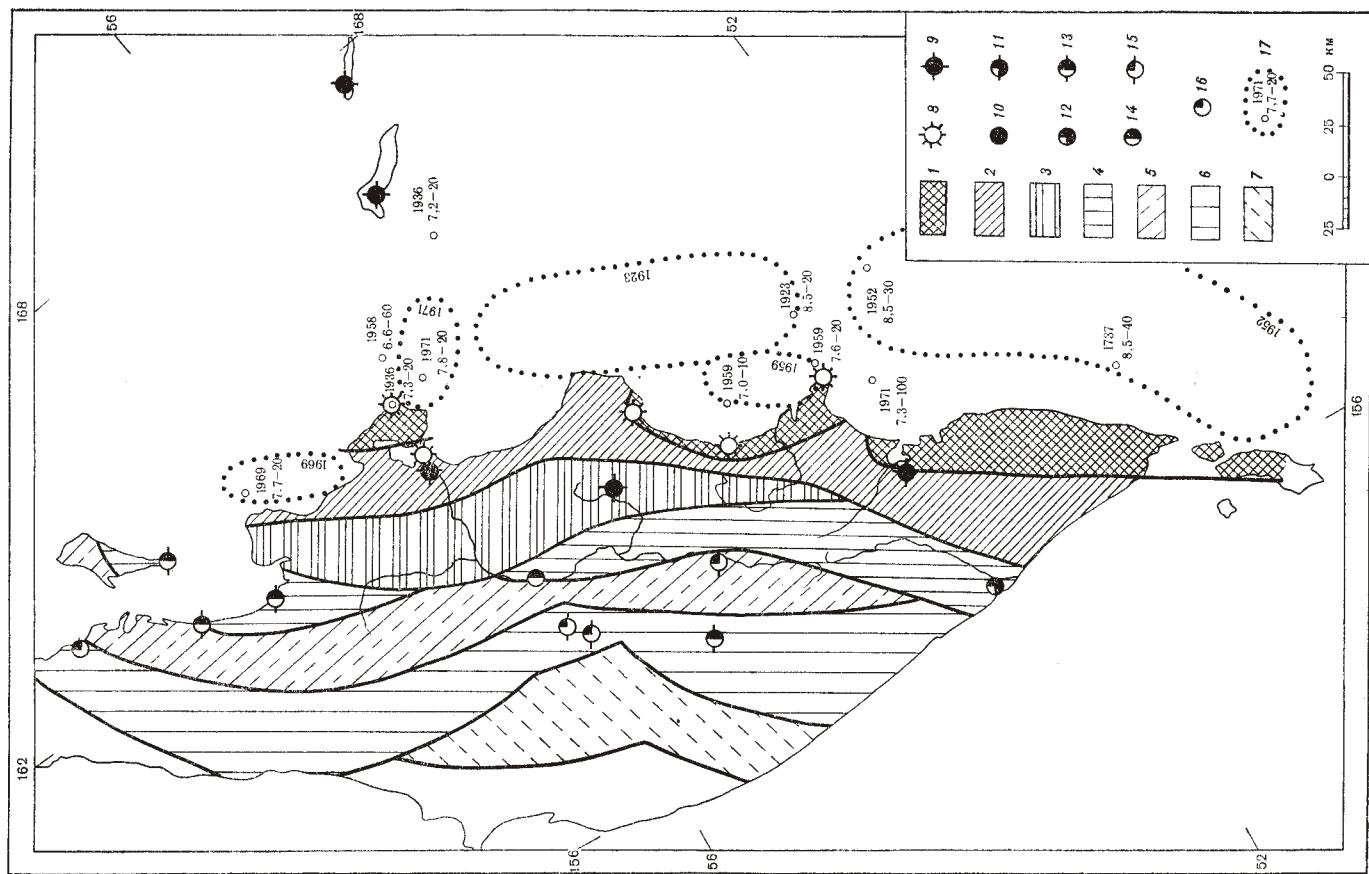


Таблица 31.2

Повторяемость землетрясений Камчатки за весь период сейсмических наблюдений (с 1899 г.) (глубина очагов 0—100 км)

M и $K_{S_{1,2}}^{68}$	Период наблюдений	Число зарегистрированных землетрясений	Число землетрясений за 10 лет
8,5	1899—1972	2	0,27
8(7,5—8,4)	1899—1972	9	1,30
7(6,5—7,4)	1899—1972	51	6,98
6(5,5—6,4)	1924—1972	205	42
13(12,5—13,4)	1964—1973	90	90
12(11,5—12,4)	1964—1973	271	271
11(10,5—11,4)	1964—1973	956	956

Графики повторяемости, приведенные к 10-летнему периоду, изображены на рис. 31.5.

Макросейсмический эффект камчатских землетрясений и повторяемость сотрясений. Землетрясения, возникая у восточных берегов Камчатки под дном океана, вызывают на полуострове и Командорских островах сотрясения силой от 3 до 10 баллов. Описания макросейсмических явлений при землетрясениях прошлых и текущих столетий позволили составить карты изосейст для отдельных землетрясений и сводную карту изосейст (рис. 31.6). Сводная карта включает сведения об 11 хорошо описанных землетрясениях. Она дополнена сведениями о разрушениях в отдельных населенных пунктах при других землетрясениях, когда пункты не располагаются в пределах изосейсты соответствующего балла карты.

Отличительной чертой карты является вытянутость огибающих изосейст одного балла вдоль восточного побережья Камчатки, что определено положением фокальной зоны камчатских землетрясений.

Сотрясения силой в 9—10 баллов испытали несколько пунктов, расположенных в местах выхода фокальной зоны на поверхность земли.

Зона 9-го балла не сплошная. Это объясняется тем, что заселенными издавна были районы г. Петропавловска-Камчатского, пос. Нижне-Камчатский, Усть-Камчатская, между ними поселений на побережье не было. Если же учесть, что в июне 1959 г. пос. Жупаново (берег Кроноцкого залива) был разрушен близким землетрясением с $M = 7,0$ ($I > 9$ баллам), то можно предположить, что и прежде в этих местах и соседних с ними происходили подобные явления.

8- и 7-балльная зоны тянутся сплошными полосами вдоль побережья Тихого океана с юго-запада на северо-восток.

На карте (рис. 31.7) и в табл. 31.3 приведены сведения об ощущимых ($I \geq 4 \div 5$ баллов) землетрясениях в различных пунктах Камчатки начиная с 1737 г.

По надежным макросейсмическим сведениям, для четырех камчатских (3.II 1923 г., $M = 8,3$; 4.XI 1952 г., $M = 8^{1/4} \div 8,5$; 4.V 1959 г., $M = 7^{3/4} \div 8$; 22.XI 1969 г., $M = 7,7$), одного курильского (6.VI 1958 г., $M = 8,2$) и одного японского (16.V 1968 г., $M = 7,8 \div 7,9$) землетрясений был определен закон спадания интенсивности с расстоянием для камчатских землетрясений [803]:

$$I_i = 1,5M - 2,63lgr - 0,0087r + 2,5.$$

Этот закон проверен и подтвержден макросейсмическими сведениями о произошедших в 1971 г.

Таблица 31.3

Сводка макросейсмических данных ($I_0 \geq 4 \div 5$ баллов) за 1737—1976 гг.

Населенный пункт	Максимальная интенсивность, в баллах, за весь период наблюдений	Год и интенсивность наблюдавшихся сотрясений, в баллах в данном году
Авача, сейсмостанция	—	1971—6; 1973—4—5; 1974—4—5; 4—5; 1975—4—5
Анавгай	—	1958—5—6
Апача	—	1889—7
Африка, мыс	9—10	1936—9—10; 1969—5; 1971—6
Ганалы	—	1958—5
Елизово	—	1950—6; 1958—4—5; 1959—7 (7—8); 1971—6
Жупаново	9	1928—9; 1959—8—9; 5—6; 5—6; >9; 1968—5; 5; 1971—4—5; 7; 1972—5; 4—5; 4—5; 1973—4—5; 4—5; 4—5; 1974—5
Ивашка	—	1969—6—7; 1976—6—7
Камаки	—	1958—6
Карага	—	1969—4—5
Карачинский, о-в	—	1969—6—7; 1976—8
Ключи	7	1909—6—7; 6—7; 1910—4—5; 1917—6; 1928—6; 1931—7; 1935—6; 1936—4—5; 6—7; 1937—5; 5; 1938—6; 5; 1939—6; 6; 1940—5; 1946—4—5; 4—5; 5; 1948—5; >7; 1959—5; 1969—5; 1971—6
Козыревск	—	1958—5; 1959—5; 1969—5—6; 1971—6
Крапивная	—	1971—5
Кроноки	9	1952—6; 1959—>9; 1970—5; 1971—7—8; 1972—6; 5; 5; 5; 5; 6; 5; 1973—6; 4—5; 4—5; 1975—5—6; 4—5; 1976—5—6; 4—5
Крутоберегово	7	1969—5—6; 5—6; 4—5; 5—6; 5; 4—5; 4—5; 5; 1971—4—5; 5—6; 5; 7; 1972—5; 1973—4—5; 4—5; 4—5; 5—6; 1975—5—6
Лопатка, мыс	—	1737—8(8—9); >6; 8(8); 1928—5; 1941—5; 1959—5—6; 1973—6
Малка	—	1945—5—6; 1958—5; 1971—5—6
Мильково	—	1945—4—5; 1959—5—6; 1971—4—5
Начики	—	1958—5; 1971—5—6
Никольское	9	1742—>7; 1849—9; 1858—8—9 (9); 1903—4—5; 1911—4—5; 1917—7—8; 1924—8(>8); 1925—>6; 1928—5; 6; 5; 1929—5; 5; 1932—6; 4—5; 4—5; 1933—4—5; 1936—8—9; 1940—6—7; 1958—5; 5—6; 5; 1965—5—6; 7; 1966—6; 1969—4—5; 1971—6—7; 1974—5
Облуковина, р., верховья	—	1738—6; 1740—6—7
Озеро, сейсмостанция	—	1971—6; 1972—6—5; 5
Октябрьский	—	1971—5
Оссора	—	1969—4—5; 1973—4; 1976—5—6
Паратунка	—	1792—9; 1854—6; 1931—8; 1971—6

Таблица 31.3 (окончание)

Населенный пункт	Максимальная интенсивность, в баллах, за весь период наблюдения	Год и интенсивность наблюдавшихся сейсмов, в баллах, в данном году
Петропавловск-Камчатский	9	1737—9(8—9); 1792—8; 1804—7; 1809—6; 1827—6—7; 1841—8; 8—9; 1843—5; 5; 1844—5; 1851—5; 1854—4—5; 6; 1866—>7; 1901—5; 1902—5; 5; 1903—5; 5; 1904—5; 5; 5; 5; 6; 7; 8; 8(7—8); 1905—5; 5; 1907—5; 6(6—7); 1909—4—5; 1911—5—6; 1913—5—6; 1915—5; 1921—5; 1922—5; 1923—6; 1926—4—5; 1928—4—5; 1929—5—6; 5—6; 5; 1930—5; 1931—5; 4—5; 4—5; 7; 1932—4—5; 1933—5; 1935—7; 1937—5—6; 4—5; 1939—4—5; 1945—5—6; 1945—5; 1950—5; 1952—4—5; 7; 1958—5—6; 1959—8; 7—8; 5; 1966—5; 1968—5—6; 1969—4—5; 4—5; 4—5; 5—6; 1961—7; 1972—5; 1975—4—5
Преображенское	9	1742—7(>7); 1849—9; 1861—7—8; 1925—>6; 1929—5
Сторож, бухта Тымлат	—	1940—5—6; 5—6; 1943—4—5
Ука	—	1969—4—5; 1973—5; 1976—5—6
Усть-Большерецк	—	1969—6
Усть-Камчатск	10	1737—5; 6; 1959—5—6 1737—9; 8; 1756—8; 1791—8; 5—6; 1792—10; 1807—5; 1908—7; 1923—7; 9; 1932—5; 1933—5; 1936—6; 8—9; 1937—5—6; 7—8; 1939—4—5; 1940—5—6; 1952—5; 1949—4—5; 1969—6—7; 1971—8
Хайлюя	—	1969—6—7
Шипунский, п-ов	9—10	1959—9—10; 1965—5; 5—6; 1958—4—5; 4—5; 6; 1969—5; 5; 1971—7—8; 1972—5; 5
Эссо	—	1958—5—6

на Камчатке сильных землетрясениях (24.XI, $M = 7,2$; 15.XII, $M = 7,7$). Кроме того, имеющиеся сведения о проявлении слабых землетрясений ($M = 4 \div 6$) также не противоречат принятому закону спадания интенсивности с расстоянием.

Оценить периоды повторения сейсм различной силы в любой точке исследуемой территории позволяет расчет карт сейсмичности по методике Ю. В. Ризниченко [618, 624]. Такие карты были построены по данным о сейсмичности Камчатки и Командорских островов за 1964—1973 гг. [803, 804].

По карте эпицентров землетрясений за эти годы были построены карты A_{10} , графики повторяемости, карта K_{\max} , зависимость $A_{10} = f(K_{\max})$. По ним рассчитывалась сейсмичность [691]. Расчеты выполнены С. С. Сейдузовой по ее программе на ЭВМ $M=220$ в ВЦ АН УзССР.

Построена серия карт периодов повторения сейсм $I \geq 10, 9, 8, 7, 6$ баллов. Общая конфигурация изолиний на всех картах примерно одинакова. Контуры равных периодов повторения сейсмов вытянуты вдоль Камчатки параллельно выходу фокальной зоны землетрясений на дно океана. Минимальные

периоды соответствуют области максимальной сейсмической активности, протянувшейся полосой вдоль восточного берега полуострова. Периоды сотрясений резко увеличиваются при движении вкрест Камчатки от восточного побережья к западному. Пределы изменений: 10 баллов и выше — от 100 лет до ∞ ; 9 баллов и выше — от 20 лет до ∞ ; 8 баллов и выше — от 10 лет до ∞ ; 7 баллов и выше — от 2 лет до ∞ ; 6 баллов и выше — от 1 года до 100 лет.

Следует отметить, что при расчете сейсмичности не учитывался эффект от землетрясений с глубиной очага больше 100 км, что занижает сейсмичность, но не сильно из-за малого количества землетрясений на этих глубинах. Так, за период с 1964 по 1973 г. глубокие землетрясения ($h > 100$ км) составляют всего 10% от общего числа землетрясений (см. рис. 31.4).

Полученные оценки периодов повторения сейсмичности согласуются с наблюденными периодами. Так, для Петропавловска-Камчатского рассчитанный период повторения сейсм в 8 баллов и выше — 40 лет, наблюденный — 55 лет $\pm \infty$ (известны всего два события); для сейсм в 7 баллов и выше аналогичные оценки — 10 и 14 ± 10 лет; для 6 баллов и выше — 3 года и 8 ± 6 лет.

Выполнение этих построений позволило получить оценку периодов повторения сейсм в любой точке Камчатки.

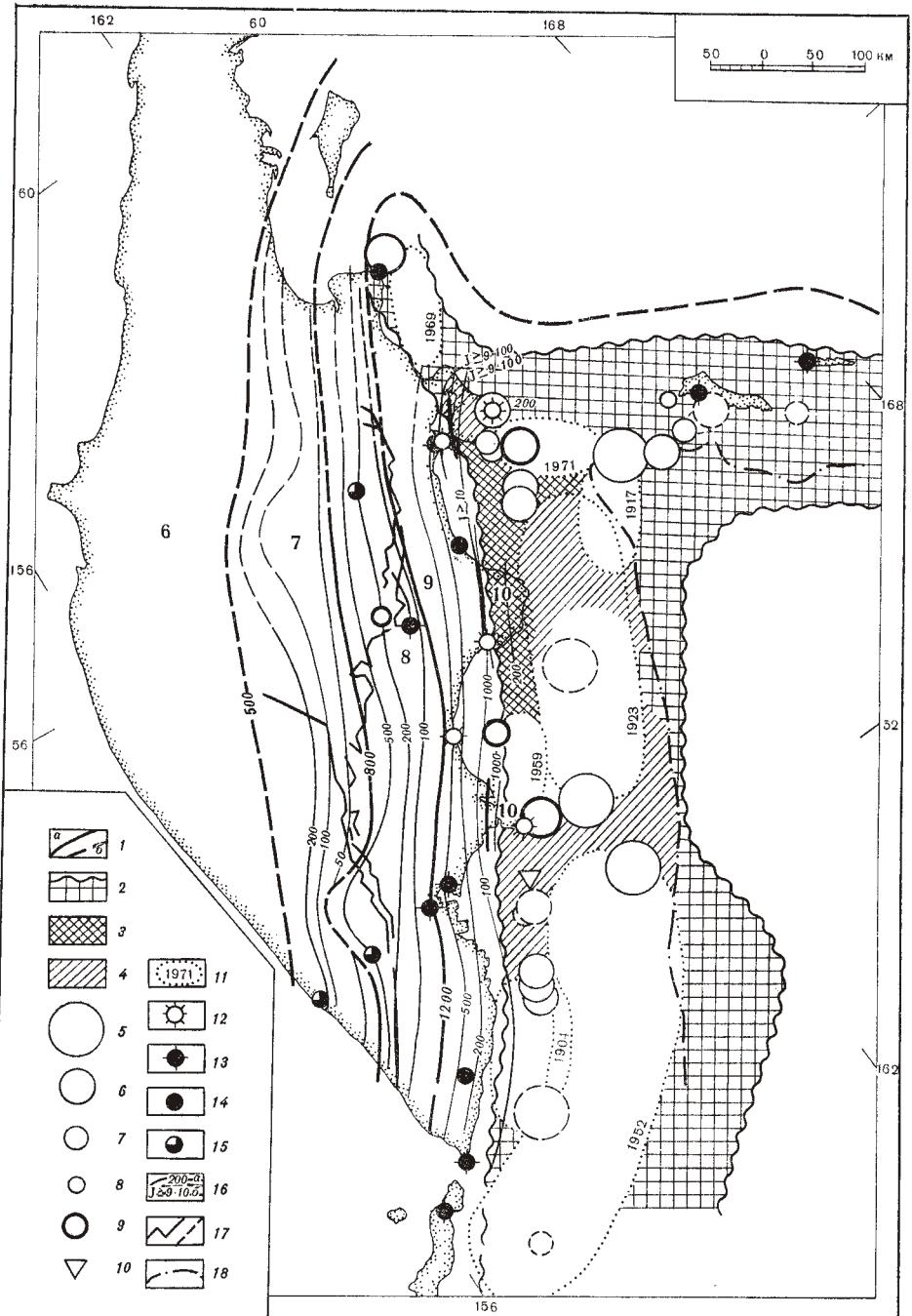
31.3 Сейсмическое районирование

На рис. 31.8 показана предлагаемая карта сейсмического районирования Камчатки и Командорских островов. Область возникновения катастрофических землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ определяется границами фокальной зоны согласно современным представлениям о ее конфигурации. В этой высокосейсмической области указаны наиболее вероятные в ближайшие десятилетия места возникновения сильных землетрясений по долгосрочному прогнозу [798]. Эпицентры землетрясений прошлого с $M \geq 7,1$ приведены в соответствии с каталогом сильных землетрясений Камчатки [805].

Расчеты карт сейсмичности позволили уточнить границы зоны интенсивности ныне действующей карты сейсмического районирования Камчатки. Для этого нынешняя карта района была совмещена с картами сейсмичности. Оказалось, что граница 9-балльной зоны практически совпадает с изолинией периода $T=1200$ лет повторения сейсм 9-го балла и выше. Граница 8-балльной зоны отвечает изолинии периода $T=800$ лет повторения сейсм 8-го балла и выше. Причем хорошее согласие границы и изолинии наблюдается на участке от Кроноцкого полуострова до южной оконечности Камчатки, что составляет примерно $3/4$ от общей протяженности границы.

Как известно, С. В. Медведевым к 9-балльной зоне отнесены те районы, где период повторения сейсм 9-го балла и выше равен именно 1200 годам, к 8-балльной зоне — районы, где период повторения сейсм 8-го балла и выше — 800 лет [454]. Таким образом, для Южной и Средней Камчатки эти оценки подтвердились расчетами сейсмичности.

На север от Кроноцкого полуострова старые границы секут соответствующие изолинии сейсмичности, т. е. проходят по точкам с совершенно разными



31.8. Карта сейсмического районирования Камчатки

1 — границы зон балльности: а — надежные, б — менее надежные; 2 — зона возможного возникновения землетрясений с $M_{\max} = 8 \frac{1}{4}$, глубина очагов до 100 км; 3 — наиболее вероятные места возникновения в ближайшие десятилетия землетрясений с $M \geq 7 \frac{3}{4}$; 4 — менее вероятные места возникновения таких землетрясений; 5—8 — эпицентры землетрясений прошлых лет, которые вызвали на Камчатке и Командорских островах сотрясения в 7 и более баллов. Пунктиром показаны землетрясения за 1737—1900 гг., тонкой линией за 1900—1956 гг., жирной — за 1957—1972 гг.; 9 — магнитуда $M \geq 8,0$; 6 — $7,1 \leq M < 8,0$; 7 — $6,1 \leq M < 7,0$; 8 — $5,1 \leq M < 6,0$; 9—10 — глубина очага: 9 — $20 \leq h \leq 40$, 10 — до 100 км; 11 — область очага сильных землетрясений (указанием даты); 12—15 — интенсивность сотрясений в отдельных пунктах при землетрясениях прошлых лет: 12 — больше 9 баллов; 13 — 9; 14 — 8; 15 — 7 баллов; 16 — изолинии периодов повторения сотрясений интенсивностью, соответствующей зоне интенсивности. В случае несоответствия зоне интенсивности у изолинии подпись указывает величина интенсивности сотрясения, период повторения которого указывает данная изолиния; а — надежные изолинии, б — менее надежные; 17 — разломы ограничения Центральной Камчатской депрессии по данным [457]; 18 — ось Курило-Камчатского желоба

периодами повторения соответствующих сотрясений.

Учитывая все изложенное, новые границы зон 9-го и 8-го баллов проведены на карте районирования по изолиниям периода повторения 1200 лет для 9-го балла и 800 лет для 8-го балла.

При сопоставления границы 7-го балла с картой сотрясаемости оказалось, что существующая граница соответствует периоду повторения сотрясений 7-го балла $T = \infty$. По С. В. Медведеву, граница зоны 7-го балла должна соответствовать периоду повторения сотрясений 7-го балла и выше $T = 300$ лет. Такая изолиния проходит в среднем на 50 км восточнее существующей границы 7-го балла. Если критерий отнесения района к 7-балльной зоне считать верным, то границу 7-го балла следует отодвинуть к востоку и провести по изолинии $T = 300$ лет повторения 7-го балла и выше. На предлагаемой карте граница 7-го балла проведена

по изолинии $T = 500$ лет повторения сотрясений 7-го балла и выше. Сделано это для того, чтобы включить в 7-балльную зону тектонически активный Срединный хребет и его западный склон. В Срединном хребте возможны поверхностные землетрясения с $M \geq 5$, которые могут иметь в эпицентре 7 баллов. Западную границу 7-балльной зоны лучше рассматривать как условную. Ее положение предстоит уточнить в дальнейшем.

На старой карте районирования к 10-балльной зоне отнесены оконечности полуостровов Шипунский и Кроноцкий. Граница 10-го балла соответствует изолинии $T = 100$ лет повторения сотрясений 9-го балла и выше и изолинии $T = 1000$ лет — 10-го балла и выше. Учитывая это обстоятельство, п-ов Камчатского мыса, где есть такие изолинии, также отнесен к 10-балльной зоне. Граница проведена по изолинии $T_{10} = 1000$ лет.

На севере границы зон 9, 8 и 7 баллов значительно расширены в связи с уточнением размеров области возможных сильных землетрясений (Озерновское землетрясение 1969 г. с $M = 7,7$; определение конфигурации фокальной зоны). При Озерновском землетрясении районы, которые по ныне действующей карте районирования расположены в 7-балльной зоне, испытали сотрясения в 8 баллов.

Внутри каждой зоны на карте районирования показаны изолинии периодов повторения сотрясений той интенсивности, к какой отнесена данная зона. Изолинии сняты с соответствующих карт сотрясаемости. Периоды повторения в зоне изменяются очень резко, поэтому характеризовать ее одним средним периодом повторения сотрясений определенного балла невозможно. Изолинии дают оценку периодов повторения практически в любой точке зоны.

Итак, на новой карте сейсмического районирования выделены следующие сейсмические зоны.

10 - б а л л ь н а я з о н а . В 10-балльную зону вошли полуострова Шипунский, Кроноцкий и Камчатский. На ныне действующей карте к 10-балльной зоне были отнесены только юго-восточные оконечности полуостровов Шипунский и Кроноцкий, т. е. эта зона несколько расширена. Это вызвано, во-первых, тем, что эти полуострова лежат в самой тихоокеанской фокальной зоне, в области возникновения неглубоких землетрясений с $M \geq 8$. Во-вторых, расчет сотрясаемости дал для этих районов значения периодов повторения $I \geq 10 - T = 1000$, $I \geq 9 - T = 100$ лет. Этот факт тоже говорит в пользу того, что здесь возможны 10-балльные сотрясения. В-третьих, в отдельных пунктах этих полуостровов уже наблюдались сотрясения силой $I = 9 \div 10$ баллов. Так, на мысе Африка в 1936 г. 13 ноября полностью уничтожены все печи и печные трубы; наблюдались обвалы и оползни; горячий источник исчез и появился вновь лишь через год [152, 220]. В 1959 г. 4 мая на мысе Шипунском: «На береговых скалах и круtyх склонах, окаймляющих мыс Шипунский со всех сторон, почти повсеместно произошли обвалы, оползни, осипы протяженностью 150—200, а в отдельных случаях 400—500 м. В отвесных скалах образовалось много вертикальных трещин, которые видны с моря на расстоянии 500—800 м от берега. В поселке на мысе Шипунском во всех деревянных домах упали печи и трубы, потрескались стекла окон» [829]. При этом же землетрясении в пос. Кроники был полностью разрушен каркасный дом, один рубленый дом сдвинут с фундамента, разрушены печи, дымоходные трубы, побита посуда и оконные стекла. Большие обвалы в массивах андезито-базальтовых лав произошли на юго-восточном окончании Кроноцкого полуострова.

9 - б а л л ь н а я з о н а . В 9-балльную зону вошли: все восточное побережье Камчатки до Восточного хребта, а также Командорские острова. Здесь согласно закону спадания интенсивности с расстоянием возможны сотрясения в 9 баллов, так как расстояние от зоны землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ не превышает для этой области 120 км. На площади, для которой рассчитывалась сотрясаемость, граница 9-го балла проведена по изолинии $T = 2000$ лет [454]. На севере граница эта проведена условно согласно положению тыловой границы фокальной зоны и макросейсмическому эффекту Озерновского землетрясения 1969 г. В отдельных пунктах наблюдались в историческое время сотрясения в 9 баллов или 8—9 баллов (мыс Лопатка,

Петропавловск-Камчатский, пос. Паратурка, Жупаново, Усть-Камчатск).

8 - б а л л ь н а я з о н а . Ее граница проведена по изолинии $T = 800$ лет повторения 8-балльных сотрясений [454]. На севере зона несколько расширена по сравнению с тем, что было показано для нее на прежней карте (по тем же причинам, что и граница 9-го балла). В 8-балльную зону полностью вошел Восточный Камчатский хребет, вдоль западного подножья которого отчетливо прослеживается крупный современный разлом. В нем наблюдались землетрясения с $M = 5 \div 6$, которые могли иметь в эпицентре силу в 8 баллов. Сильнейшие землетрясения в фокальной зоне Камчатки могут вызвать здесь 8-балльные сотрясения согласно закону спадания интенсивности с расстоянием.

7 - б а л л ь н а я з о н а . Площадь 7-го балла сокращена по сравнению с прежней картой. Граница проходит в среднем на 50 км восточнее прежней, по изолинии $T = 500$ лет повторения 7-балльных сотрясений. На севере граница продолжена условно согласно макросейсмическим данным по Озерновскому землетрясению 1969 г. В зону вошла область, заключенная между западными отрогами Восточного и Срединного хребтов. Здесь возможны поверхность землетрясения с $M = 5 \div 5,5$.

Остановимся более подробно на сейсмической характеристике отдельных наиболее важных населенных пунктов Камчатки.

Город Петропавловск-Камчатский оставлен в 9-балльной зоне. Он расположен на расстоянии 85 км от оси очага ближайшего к Петропавловску возможного землетрясения с $M \geq 8$. По принятому для Камчатки закону спадания интенсивности с расстоянием землетрясения с $M=8$ вызывают на таком расстоянии сотрясения силой в 9 баллов. Продолжительность сейсмического цикла в фокальной зоне [795, 796] составляет для землетрясений с $M \geq 7,8$ 140 ± 60 лет, а следовательно, такой же может быть и частота сотрясений в 9 баллов на берегу. Из расчетов сотрясаемости следует, что период повторяемости таких сотрясений в Петропавловске-Камчатском равен 300 годам. Все это подтверждает принятую 9-балльную сейсмическую опасность для Петропавловска-Камчатского.

В Петропавловске-Камчатском ежегодно происходит большое число слабых ($I \leq 6$ баллов) сотрясений. Их статистика за 1965—1973 гг., когда имеются полные данные, приведена в табл. 31.4.

Таблица 31.4
Ощущимые землетрясения в Петропавловске-Камчатском в 1965—1973 гг.

Год	Интенсивность, балл									Всего
	2	2-3	3	3-4	4	4-5	5	5-6	6	
1965	—	—	—	—	2	1	—	—	—	2
1966	—	—	1	—	2	—	1	—	—	4
1967	—	—	3	1	—	—	1	—	—	3
1968	—	—	2	2	3	1	—	1	4	10
1969	—	—	—	—	3	3	—	1	—	7
1970	—	—	2	1	3	—	—	—	—	6
1971	—	—	1	—	4	—	—	—	—	1
1972	5	4	9	1	2	—	4	—	—	43
1973	7	3	6	1	6	—	—	—	—	13
Всего	12	7	22	6	25	5	3	2	1	65

Усть-Камчатск. На ныне действующей карте районирования пос. Усть-Камчатск лежит в области 8-балльных сотрясений. На предлагаемой карте он отнесен к 9-балльной зоне. Во-первых, он лежит лишь в ~ 15 км от зоны возникновения землетрясений с $M > 8$. Во-вторых, период повторения сотрясений $I \geq 9$ баллов для пос. Усть-Камчатска 140 ± 60 лет (сейсмический цикл) или 180 лет (сопротивляемость). В-третьих, пос. Усть-Камчатск уже испытывал 9-балльные сотрясения в 1737, 1792, 1923, 1936 гг. В-четвертых, пос. Усть-Камчатск расположен вблизи области наиболее вероятного возникновения в ближайшие десятилетия землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$.

Поселок Ключи «переместился» из 7- в 8-балльную зону. По закону спадания интенсивность с расстоянием (поселок расположен в 130—140 км от зоны с $M > 8$) здесь могут происходить сотрясения в 8 баллов при землетрясениях с $M \geq 8$ у берегов Камчатки. Повторяемость таких землетрясений, а следовательно, и сотрясений в 8 баллов пос. Ключи составляет 140 ± 60 лет по сейсмическому циклу.

По расчетам сопротивляемости получается довольно большой разброс в оценке повторяемости 8-балльных сотрясений в пос. Ключи. Рассчитывалось шесть вариантов карт сопротивляемости, отличавшихся друг от друга заданием исходных данных (A_{10} , K_{\max} , γ , число лет наблюдений). Поселок Ключи по трем вариантам счета лежит внутри, а по двум — вне 8-балльной зоны, по одному из вариантов на изолинии $T = 800$ лет. Ширина области, занятой изолиниями, порядка 60 км. Средняя повторяемость 8-балльных сотрясений в пос. Ключи оценивается величиной $T \leq 800$ лет. По этим данным, пос. Ключи находится в 8-балльной зоне вблизи границы 8-го и 7-го баллов¹.

Правда, макросейсмические сведения, имеющиеся для пос. Ключи лишь с 1909 г., не сообщают о 8-балльных сотрясениях в поселке. Однако период наблюдений (70 лет) значительно меньше периода повторения сотрясений 8-го балла для 8-балльной зоны. Следовательно, отсутствие на сегодня данных о 8-балльных сотрясениях в пос. Ключи не противоречит отнесению его к 8-балльной зоне.

К тому же за этот период времени пос. Ключи испытал три сотрясения силой 7 баллов (1909, 1931, 1948 гг.). Такая высокая повторяемость 7-балльных сотрясений никак не соответствует 7-балльной зоне.

Приводим примеры описания сильных сотрясений в пос. Ключи.

«По свидетельству В. С. Кулакова, печнику Лесокомбината в с. Ключи за осень 1931 г. не удалось сложить ни одной печи: землетрясения неизменно их разрушали. Пустотелый кирпич, сохнувший на земле, кололся на части. В одном доме обрушился потолок. Печи давали трещины. Зарегистрировано несколько случаев обрушения печных труб, лопнувших стекол. Землетрясения нередко вызывали панику. Наиболее сильные толчки, вероятно, достигали 7 баллов» [387, 388].

«... В 1948 г. 6 ноября последовал ряд сильных толчков с западной стороны Харчинского хребта, которые ощущались в пос. Ключи. Разрушено много печей и печных труб; люди в испуге выбегали на улицу. Сила 7 или более баллов».

Прогнозная оценка сейсмического воздействия для Петропавловска-Камчатского. В настоящее время отсутствует надежная оценка количественных параметров разрушительных землетрясений Камчатки, так как не получены записи максимальных возмож-

ных землетрясений. Хотя есть единичные записи нескольких слабых землетрясений, этого материала недостаточно для надежного количественного определения параметров сейсмического воздействия на Камчатке. Тем не менее была сделана попытка, используя имеющийся ограниченный материал, оценить характеристики возможного максимального воздействия на Камчатке, в первую очередь для Петропавловска-Камчатского — основного населенного пункта Камчатки, экономического центра области. Оценка производилась для землетрясения с $M = 8,25$ при $\Delta \leq 90$ км, т. е. для землетрясения, которое, как следует из материалов, изложенных в предыдущих разделах статьи, может вызвать в городе максимальные сотрясения ($I = 9$ баллов).

В качестве трех важнейших характеристик, которые в целом составляют оценку воздействия сильнейшего землетрясения для скального грунта в Петропавловске-Камчатском, были выбраны: величина максимальной скорости грунта в области периодов 1—1,25 с, форма спектра Фурье акселерограммы и длительность интенсивных колебаний.

Для получения первой из упомянутых характеристик В. В. Штейнбергом и С. А. Федотовым была использована экстраполяция значений скорости колебаний, зарегистрированных при землетрясениях слабых и средней силы, в область сильных движений. В результате анализа 26 землетрясений, зарегистрированных в Петропавловске-Камчатском в 1961—1964 гг., с эпицентralьными расстояниями от 90 до 320 км, с магнитудой M от 3,6 до 6,3 ($K_{S_{1,2}}^{\Phi 68}$ от 10 до 14) ими была найдена зависимость между максимальной скоростью колебаний (V_{\max} , см/с) и энергией очага ($K_{S_{1,2}}^{\Phi 68}$) землетрясения для фиксированного расстояния ($\Delta = 90$ км):

$$\lg \dot{x}_{\max} = 0,62 K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} - 9,05. \quad (31.1)$$

В предположении, что найденную связь между скоростью и энергией можно экстраполировать в область землетрясений с $M > 6,3$, было получено, что при землетрясении с $M = 8,25$ ($\Delta = 90$ км, $h = 30$ км), скорость колебаний скального грунта достигает 30 см/с. Оценка относилась к периоду 1,25 с.

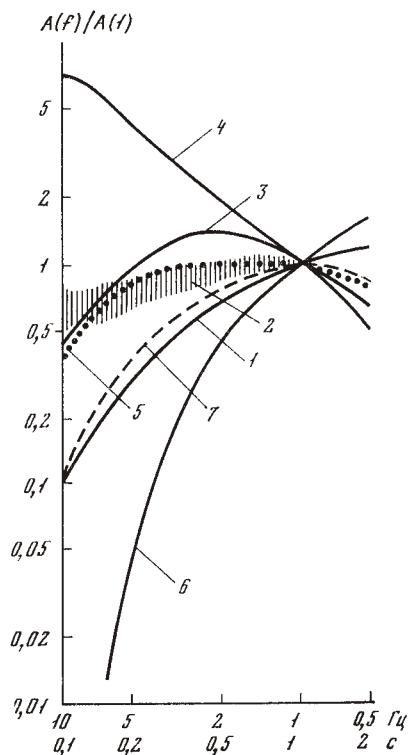
Если в формуле (1) использовать в качестве предельного значения $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68}$ не значение $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 17,0$, полученное авторами обсуждаемой работы по корреляционной формуле

$$K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 4,6 + 1,5 M_{LH}$$

[797] при $M_{LH} = 8,25$, а значение $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 16,1$, следующее из аналогичной формулы $K_{S_{1,2}}^{\Phi 68} = 2,1 + 2 m_b$ [797] при практическом предельном по земному шару значении $m_b^{CKM} = 7,0$ (при этом \dot{x}_{\max} , m_b и K относятся к одному и тому же частотному диапазону, что делает корреляцию надежнее), то оценка \dot{x}_{\max} составляет 9 см/с. Эта оценка \dot{x}_{\max} оказывается неожиданно низкой.

С другой стороны, при Петропавловском землетрясении 24.X 1971 г. с $M = 7,2$, при котором интенсивность на «средних» грунтах в городе составила 7 баллов, на скальном грунте сейсмостанции Петропавловск зафиксирована максимальная скорость 6,5 см/с с периодом 1,2 с при макросейсмическом эффекте в 5,5 балла. Если воспользоваться стандартным соотношением балл — логарифм амплитуды, пересчет для 9 баллов даст значение скорости 26 см/с.

¹ Практически интенсивность может быть меньше при хороших грунтовых условиях.



31.9. Спектры Фурье ускорений от сильных землетрясений (сглажены от руки и нормализованы к единице на 1 Гц):

Камчатские землетрясения: 1 — Усть-Камчатское землетрясение, $M = 7,8$, $\Delta = 70$ км [855]; 2 — Озерновское, $M = 7,7$, $\Delta = 250$ км [800] (спектры скорости двух каналов значительно различались); 3 — Петропавловское, $M = 7,3$, $\Delta = 100$ км, $\Delta = 70$ км [855]; 4 — аномальное Перуанское землетрясение, $M = 7,7$, $\Delta = 300$ км [883]; 5 — средний калифорнийский спектр для скалы, $M = 6,5\text{--}7,5$ [937]; 6 — прогнозный спектр В. В. Штейнберга, $M = 8,3$, $\Delta = 90$ км [855]; 7 — прогнозный спектр А. А. Гусева

При 9-балльном землетрясении на средних грунтах в городе на сейсмостанции на скальном грунте, по-видимому, следует ожидать силу сотрясения в 7,5 балла. Корреляция баллов со средними значениями максимальной скорости, сделанная в статье [61], дает для 7,5 балла значение максимальной скорости 13 см/с. Упомянем еще две зарубежные оценки, цитированные В. В. Штейнбергом и С. А. Федотовым. К. Канаи [907] на основе анализа 507 землетрясений Японии получил значение скорости колебаний скального грунта при землетрясении с $M = 8,25$ и $\Delta = 90$ км равным 21 см/с. По данным о мексиканских землетрясениях Эстева и Розенблют [894] получили формулу $\dot{x} = 16 e^{M \Delta^{-1}}$, которая дает для $M = 8,25$ значение 29 см/с.

В результате сопоставления всех приведенных оценок наиболее надежной величиной максимальной скорости на скале при максимальном возможном землетрясении ($M = 8,25$, $\Delta = 90$ км, $I = 9$ баллов) можно считать величину 20 см/с и относить ее к периоду 1,25 с. Максимальное ускорение при этом (с учетом обсуждаемой ниже формы спектра) составит около 0,1 g.

Вопрос о форме спектра сейсмического воздействия обсуждался ранее В. В. Штейнбергом [852, 853]; окончательный вариант его предполагаемого спектра дан в работе [855]. Часть спектра, относящаяся к частотам 3—10 Гц, получилась, на наш взгляд, существенно заниженной. Это видно из сопоставления спектров, приведенных на рис. 31.9. На нем

изображены следующие спектры ускорений (сглаженные от руки и нормированные к 1 на частоте 1 Гц): спектры камчатских землетрясений — поверхностных Озерновского [800] и Усть-Камчатского [855], аномального Перуанского землетрясения 1970 г. [884], «средний калифорнийский спектр» по работе [937] для $M = 6,5\text{--}7,5$. Все эти спектры относятся к землетрясениям с $M \sim 7\text{--}8$, однако нет оснований ожидать серьезных изменений формы спектра в этой области частот при переходе от $M \sim 7,5$ к $M \sim 8,3$.

На том же рисунке показан упомянутый расчетный прогнозный спектр ускорений сотрясения скального грунта на расстоянии 90 км от камчатского землетрясения с $M = 8,25$, построенный В. В. Штейнбергом.

Следует отметить, что записи Озерновского и Усть-Камчатского землетрясений получены не на скальном грунте. Пересчет их к скале в настоящее время не представляется возможным.

Примеры реальных спектров камчатских землетрясений показывают, что даже для низкочастотного корового землетрясения на расстояниях порядка 100 км спектральная плотность ускорений может падать в области частот от 1 до 10 Гц только на порядок (Усть-Камчатское землетрясение) или менее (Озерновское землетрясение). В низкочастотной области по реальным спектрам можно ожидать, что плоская часть спектра ускорений может тянуться до 0,5, а возможно, и 0,3 Гц. Данные по другим сейсмоактивным регионам подтверждают эти особенности спектров. С учетом изложенного необходимость корректировки прогнозного спектра В. В. Штейнберга кажется очевидной. Однако надежная основа для получения нового прогнозного спектра отсутствует. Более того, учитывая большие вариации формы реальных спектров землетрясений с $M > 7$, единичный прогнозный спектр может вообще быть недостаточной характеристикой будущих сейсмических воздействий, которые могут быть весьма разнообразными. Тем не менее в качестве временной рабочей основы для инженерно-сейсмических работ мы предлагаем новый нормированный прогнозный спектр, также приведенный на рис. 31.9. При его построении мы ориентировались главным образом на форму спектра Усть-Камчатского землетрясения.

Для оценки длительности интенсивных колебаний (т. е. с амплитудами, превышающими 25—30% от максимальной), следует учесть, что при сильнейших землетрясениях в Петропавловске длительность сотрясений будет определяться длительностью процессов в очаге. Считая длину очага Курило-Камчатского землетрясения с $M_{LH} = 8,25$ равной 200 км (Аверьянова, цит. по [771]), а скорость вспарывания — 2,5 км/с, получим время работы очага 80 с. Такая же величина длительности дана Н. В. Шебалиным [845] для землетрясений с $M = 8,2$ в среднем по земному шару. Для очень крупного Аляскинского землетрясения 1964 г. ($M = 8,4$) время вспарывания и длительность сильных колебаний в ближней зоне составляли до 3—4 мин. Эту величину можно считать предельной.

Таким образом, ожидаемая длительность интенсивных колебаний при землетрясении с $M_{LH} = 8,25$ равна 1—2 мин.

Надежность приведенных оценок пиковой скорости и длительности колебаний для Петропавловско-Камчатского нельзя обсуждать, не придав им некоторого точного вероятностного смысла. Например, это

Могут быть величины, превышение которых за период в T лет имеет вероятность в $K\%$. Мы имеем в виду $T \sim 300$ лет и $K \sim 50\%$, но на данном этапе обсуждение вопроса обоснованного выбора значений T и K , равно как и вопроса степени обоснованности отнесения наших оценок к этим конкретным значениям T и K , представляется преждевременным.

Совокупность оценочного значения максимальной скорости (20 см/с), ускорения ($0,1 g$) и приблизительной формы нормированного спектра ускорений (рис. 31.9, кривая 7), полученных для скального грунта, а также длительности интенсивных колебаний (1—2 мин) можно на данном этапе считать допустимой основой для инженерно-сейсмических работ. Нельзя, однако, забывать, что сделанные нами предварительные оценки имеют довольно грубый характер и, безусловно, требуют дальнейших уточнений.

* * *

На карте сейсмического районирования Камчатки и Командорских островов (см. рис. 31.8) сохраняются наиболее характерные черты ныне действующей аналогичной карты (максимальный балл, вытянутость изолиний интенсивности в направлении с юго-запада на северо-восток, ширина зон одного балла) [764, 221]. Изменения коснулись в основном периферийных районов зоны, особенно севера Камчатки. Это связано с тем, что со времени создания (1965 г.) ныне действующей карты сейсмического районирования был накоплен новый сейсмологический материал и просмотрен большой массив данных наблюдений за прошлые годы. Это позволило уточнить характеристики

сейсмического режима и границы интенсивности, внести в новую карту районирования элементы, требуемые техническим заданием по составлению карты сейсмического районирования территории СССР [460], — зону возникновения очагов сильных землетрясений, эпицентры сильнейших землетрясений прошлого, периоды повторения сотрясений определенного балла.

При построении карты сейсмического районирования Камчатки и Командорских островов использовались данные детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и Командорских островах в 1964—1972 гг. сведения о сильных землетрясениях 1737—1972 гг., о новейшей тектонике и расчеты сотрясаемости по методике Ю. В. Ризниченко. Все эти материалы дополняют друг друга и хорошо согласуются между собой.

Следует отметить расширение зон 9-го и 8-го баллов на севере полуострова, вызванное в значительной мере возникновением в 1969 г. Озерновского землетрясения, а также сильное сокращение 7-балльной зоны на Западной Камчатке, которое позволили сделать результаты расчетов сотрясаемости.

Менее надежные участки границ между зонами интенсивности показаны на карте пунктирами (см. рис. 31.8). При составлении новых карт сейсмического районирования Камчатки желательно уточнить положения этих границ, оценки повторяемости землетрясений и прогноз мест следующих возможных землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, иметь более глубокие сведения о вызывающих землетрясения современных движениях и ввести спектрально-временные характеристики землетрясений.