

УДК: 550.34

ФЕДОТОВ С. А., ШУМИЛИНА Л. С., ЧЕРНЫШЕВА Г. В.

**СЕЙСМИЧНОСТЬ КАМЧАТКИ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВОВ
ПО ДАННЫМ ДЕТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

SEISMICITY OF KAMCHATKA AND COMMANDER ISLANDS AS DERIVED FROM DETAILED STUDIES by, Fedotov S. A., Shumilina L. S., and Chernysheva G. V. Seismicity of Kamchatka and Commander Islands is analyzed on the basis of detailed seismic studies conducted in 1962—1983. More than 40 000 hypocenters were determined. Initial data are representative in terms of their duration and completeness. The location of hypocenters is shown on maps of epicenters for depths 0—50, 51—100, 101—150, 151—200, and 201—250 km on vertical sections oriented along and across Kuril-Kamchatka and Aleutian arcs. A large majority of foci lie within the seismofocal layer (Wadati—Zavaritskii—Benioff zone). Besides, the distinguished features are: the seismicity of the deep—sea trench and, in Kamchatka proper, the seismicity of faults, framing the depression of the Kamchatka River, of the volcanic belt and of the transverse structure located at the parallel bend of the trench, seismofocal layer, and of the belt of volcanoes. Graphs of earthquake recurrence, maps of seismic activity A_{10} , and released seismic energy D , and cumulative graphs of seismic energy are presented. In 1962—1983 an average number of small earthquakes occurred in Kamchatka but relatively few earthquakes were recorded with $M \geq 6$; seismic energy sufficient for several earthquakes with $M \sim 8$ has been accumulated. The mean amount of energy released in 1899—1986 per unit length of the arc in Kamchatka and Kuril Islands is equal (within the accuracy of a few per cent). This fact shows equal intensity of seismic processes along the entire Kuril-Kamchatka island arc. The authors discuss the relationship between seismicity on the one hand, and volcanism and tectonics, on the other. Further tasks are considered.

(Received July 1, 1987)

Institute of Volcanology, Far East Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii; 683006, USSR

Institute of Physics of the Earth, USSR Academy of Sciences, Moscow; 123810, USSR

Institute of Physics of the Earth, Kamchatka Geophysical Station, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii; 683024, USSR

Сейсмическая деятельность у тихоокеанского побережья Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии достигает наивысшего на Земле уровня.

В Курило-Камчатской области происходит около 80% землетрясений СССР, в том числе почти все землетрясения с $M \geq 7 \frac{3}{4}$, и большинство глубоких. Глубины очагов в сейсмофокальном слое Курило-Камчатской островной дуги (зоне Вадати—Заварицкого—Беньоффа) достигают 650 км. На подводном склоне дуги лежат очаги больших цунамигенных землетрясений. Вдоль пояса вулканов Камчатки и Курильских островов, в котором находится около 12% наземных действующих вулканов Земли, наблюдаются многочисленные вулканические землетрясения и вулканическое дрожание, связанное с извержениями.

В районе Камчатского залива и Командорских островов расположена область стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, которая относится к наиболее важным и интересным тектоническим узлам

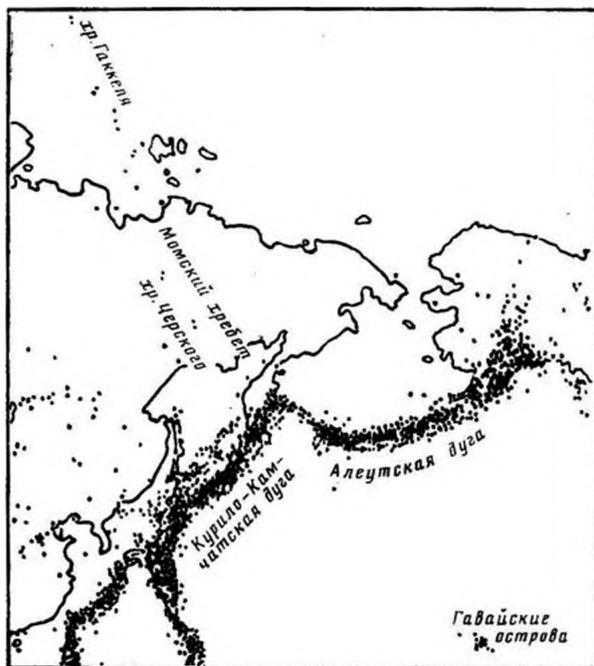


Рис. 1. Схема расположения сейсмических поясов, сходящихся в районе Камчатки. Эпицентры $M \geq 4,5$ за 1963—1977 гг.

мира (рис. 1). Здесь сходятся Курило-Камчатская, Алеутская (западным окончанием которой являются Командорские острова) островные дуги и крупный подводный хребет Императорских гор, тянущихся от Гавайских островов. Здесь же соединяются курило-камчатская и алеутская фокальные зоны с большим, но менее активным поясом землетрясений, протягивающимся сюда широкой полосой от Срединно-Атлантического хребта через хр. Гаккеля в Ледовитом океане к северной Камчатке по линии хр. Гаккеля — низовье р. Лены — хребты Момский и Черского — Магадан и п-ов Тайгонос (см. рис. 1). Эта линия может быть границей литосферных плит, положение которой является спорным для северо-восточной Азии. В районе стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг находится самое резкое пересечение глубоководных желобов в мире, а также один из самых мощных магматических центров мира — Ключевская группа вулканов.

Наиболее полные и точные данные о сейсмичности Камчатки были получены во время детальных сейсмологических исследований, которые начались здесь с ноября 1961 г. В этой статье по данным наблюдений 1962—1983 гг. рассматриваются такие общие свойства сейсмичности Камчатки и Командорских островов, как размещение очагов землетрясений энергетических классов $K_{S1,2}^{\Phi 18} \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$), уровень сейсмичности и сейсмическая активность, сбрасывание сейсмической энергии, а также связь сейсмичности с тектоникой, геодинамикой и вулканизмом. Предварительно приводятся краткие сведения о сейсмичности Камчатки до периода детальных сейсмологических исследований, в 1737—1961 гг.

Изучение сейсмичности Камчатки в 1737—1961 гг.

В изучении сейсмичности Камчатки было несколько больших этапов: период макросейсмических наблюдений, XVIII—XIX вв.; период инструментальных наблюдений удаленными станциями, 1900—1961 гг.; период

детальных сейсмологических исследований, проводимых камчатской региональной сетью станций с ноября 1961 г.

Научные исследования на Камчатке были начаты в середине XVIII в. Первой и Второй Камчатскими экспедициями Витуса Беринга. Членом Второй Камчатской экспедиции, в задачи которой входило освоение северо-восточной части России (Охотское море, северная часть Тихого океана, Восточная Сибирь и Камчатка), был С. П. Крашенинников. Крашенинников составил классическое «Описание земли Камчатки», где назвал Камчатку страной огнедышащих гор и сильных «трясений земли» [17].

Первые исследователи Камчатки оставили подробные описания сильных землетрясений, свидетелями которых они были сами и о которых узнали из рассказов очевидцев.

Сводки макросейсмических данных о землетрясениях Камчатки в XVIII—XIX вв. имеются в большом количестве научных трудов [8, 9, 12, 19, 20, 22, 50 и др.]. Сведения о камчатских землетрясениях содержатся в исторических документах, архивах, в записях путешественников, натуралистов, офицеров и чиновников прошлых лет.

Главный итог всех этих сообщений и исследований — Камчатка оказалась краем с большим числом землетрясений, среди которых наблюдались и гигантские.

За период инструментальных (макросейсмических) наблюдений на Камчатке зафиксировано около 30 землетрясений с $M \sim 5-8$. Сведения об этих землетрясениях обобщены в «Новом каталоге» [21] и других публикациях.

Наиболее выдающимися событиями были землетрясения 1737 г. — $M \sim 8,3$; 1792 г. — $M \sim 8,4$; 1841 г. — $M \sim 8,4$; 1849 г. — $M \sim 7,5$ [21]. Протяженность очагов первых двух составляла более 300 км. Сила сотрясений достигала 9 баллов.

С начала XX в., точнее, с 1897 г. [47], мировая сеть сейсмических станций начала систематическую регистрацию землетрясений. С этого момента появляются инструментальные данные о землетрясениях Камчатки.

В первые годы эти данные были основаны на записях удаленных станций. Но в 1915 г. по предложению Б. Б. Голицына была открыта первая сейсмическая станция на Дальнем Востоке, в Петропавловске на Камчатке [5, 15, 36]. К сожалению, эта станция проработала недолго, всего до 1918 г., и была открыта вновь лишь в 1951 г. Поэтому событием, важным для наблюдений, было открытие в 1924 г. станции в Иркутске, ближайшей к Камчатке в то время. В дальнейшем появилась сеть станций общего типа на Дальнем Востоке СССР. В разные годы сейсмические станции были открыты во Владивостоке (1929); в Южно-Сахалинске (1948); Курильске (1952—1953), Северо-Курильске (1958) на Курилах; Охе (1958) на Сахалине; на Южных Курилах сеть из шести региональных станций стала работать с 1958 г. На самой Камчатке региональные станции открылись в пос. Ключи (1947 г.), в Козыревске (1958 г.) и на Апахончиче (1960 г.).

По мере совершенствования и расширения сети станций шло понижение уровня представительной регистрации камчатских землетрясений. В период 1897—1923 гг. представительными были лишь землетрясения с $M_{\text{ггг}} = 7$; в 1924—1951 гг. с $M_{\text{ггг}} = 6$, а к 1961 г. — с $M_{\text{ггг}} = 5$ [2, 33]. К 1961 г. точность определения координат камчатских землетрясений оставалась еще низкой и составляла ± 50 км и более [2, 4]. Подробный анализ сейсмичности Камчатки этого периода дан в обзорной статье С. А. Федотова и А. М. Багдасаровой [33].

Карта эпицентров землетрясений с $M \geq 6$ за период инструментальных наблюдений (по 1961 г.) приведена на рис. 2. Координаты и магни-

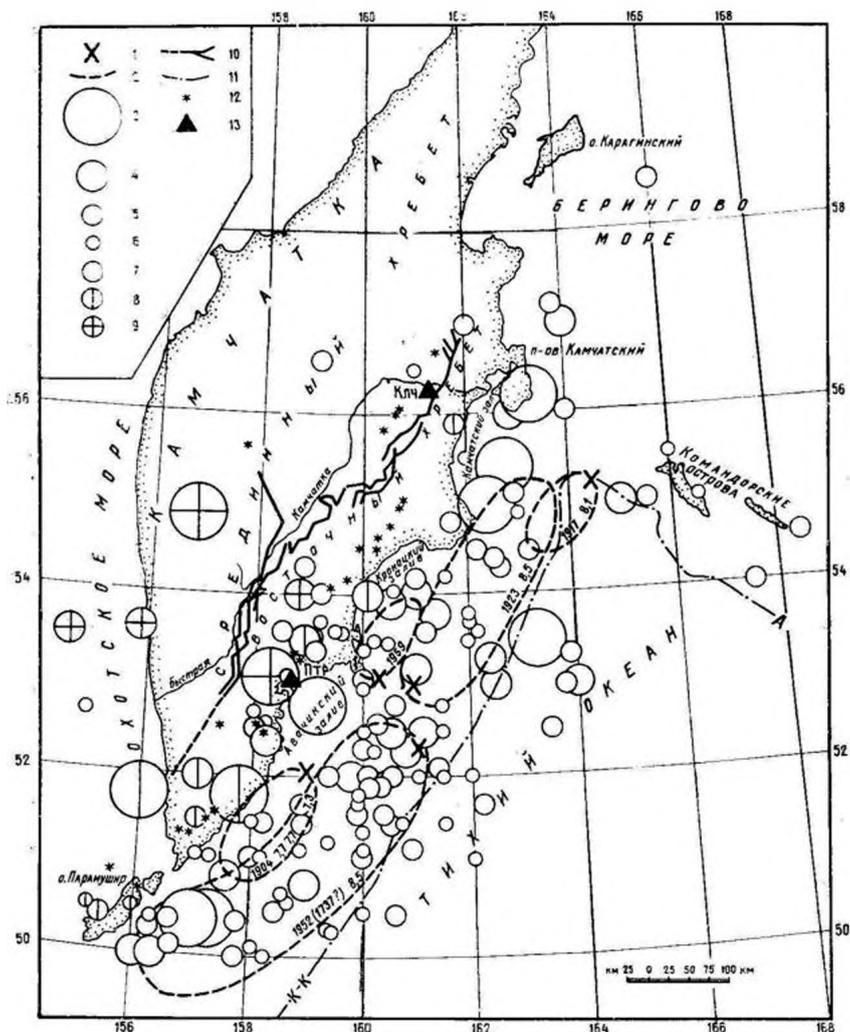


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Камчатки и Командорских островов за 1900—1961 гг., зарегистрированных до начала детальных наблюдений; $M \geq 6$. 1 — инструментальный эпицентр сильных ($M \geq 7,8$) землетрясений; 2 — область афтершоков землетрясений $M \geq 7,8$; 3—6 — эпицентры землетрясений: $M=7,5$ (7,3—7,75); $M=7,0$ (6,8—7,25); $M=6,5$ (6,3—6,75); $M=6,0$ (5,826,25) соответственно; 7—9 — глубина очага: 0—100; 101—200; больше 200 км соответственно; 10 — крупнейшие разломы, пунктир — предполагаемые [18]; 11 — оси глубоководных желобов Курило-Камчатского (К—К) и Алеутского (А); 12 — вулканы; 13 — сейсмостанции

туды части землетрясений уточнены по сравнению с предыдущими работами [30, 31, 33] в соответствии с данными «Нового каталога...» [21].

На карте землетрясения обозначены кружками, радиус которых соответствует среднему радиусу очага землетрясения соответствующей магнитуды [26] в масштабе карты.

За 60 лет инструментальных наблюдений удаленными станциями у берегов Камчатки зарегистрировано два землетрясения с $M \approx 8,5$ (1923 г., 1952 г.); шесть землетрясений в диапазоне магнитуд 7,5—8,4, из которых следует отметить серию из трех землетрясений у берегов Южной Камчатки (два — $M=7,7$; одно — 7,3) 1904 г.; 14 землетрясений в диапазоне магнитуд 7,1—7,4.

Уровень сейсмичности и ее размещение у берегов Камчатки определили два гигантских землетрясения: 1923 и 1952 гг. с их многочислен-

ными афтершоками. Протяженность очагов 300—600 км. Очаг землетрясения 1923 г. протягивается от мыса Шипунский на север до п-ва Камчатский; очаг землетрясения 1952 г.— от мыса Шипунский на юг до о-ва Парамушир. С востока очаги ограничены Курило-Камчатским желобом, с запада — восточными п-овами Камчатки. По глубине эти два землетрясения, их афтершоки, а также все другие землетрясения в этой области охватывают слой 0—100 км, имея преобладающую глубину 40 км.

Более глубокие очаги расположены к западу от этой наиболее сейсмичной области. Глубины 100—200 км характерны для землетрясений, очаги которых находятся под поясом вулканов и Восточными хребтами Камчатки, на больших глубинах лежат очаги под Срединным хребтом, наибольшие глубины (500 км) характерны для очагов землетрясений, расположенных под Охотским морем.

На север и восток от п-ова Камчатский сейсмичность резко ослабевает: в 1900—1961 гг. в Беринговом море и у Командорских островов были зарегистрированы отдельные землетрясения с $M \geq 6$ (см. рис. 2).

В результате инструментальных сейсмологических наблюдений к 1961 г. были установлены действительный уровень сейсмичности Камчатки, существование фокального слоя (зона Вагати — Заварицкого — Беньоффа), общий характер размещения землетрясений. Были получены данные о главных толчках и роях афтершоков крупнейшего землетрясения 4(5).XI.1952 г. с $M \sim 8,5$, вызвавшего катастрофическое цунами [7, 27], и сильного землетрясения 4.V.1959 г. с $M \sim 7,6$, которое ощущалось в г. Петропавловске-Камчатском с силой 7—8 баллов [6, 7, 14, 46 и др.].

Кроме того, были зарегистрированы сейсмические явления, сопровождавшие извержение и направленный взрыв вулкана Безымянный в 1955—1956 гг., деятельность Ключевского вулкана [29] и др.

До 1961 г. на Камчатке не было сети сейсмических станций. До 1947 г. координаты очагов камчатских землетрясений определялись по данным удаленных станций с погрешностью обычно $\pm 1^\circ$. В 1947—1960 гг., после создания дальневосточной региональной сети сейсмических станций, ошибки определения координат эпицентров снизились в среднем до $\pm 0,5^\circ$. В эти годы слабые землетрясения регистрировались только вблизи сейсмостанций Ключи и Петропавловск.

Таких данных было совершенно недостаточно для изучения сейсмичности, ее связей со строением, свойств коры и мантии, связей сейсмичности с вулканизмом, геодинамикой, проведения сейсмического районирования.

Для решения этих и многих других задач сейсмологии и вулканологии была необходима развитая сеть сейсмических станций на Камчатке.

Детальные наблюдения 1961—1986 гг.

Камчатская сеть сейсмических станций была создана в 1960—1961 гг. Тихоокеанской сейсмической экспедицией (ТСЭ) Института физики Земли АН СССР (ИФЗ) совместно с Камчатской геолого-геофизической обсерваторией АН СССР (КГГО) [37, 38]. Сеть начала регистрацию 1.XI.1961 г. С этого времени наступил третий период изучения сейсмичности Камчатки — период детальных сейсмологических исследований, длящихся до настоящего времени уже четверть века. 1.XI.1961 г. в сеть входили региональные сейсмические станции (рис. 3): Петропавловск (Птр), Тополово (Тпл), Усть-Большерецк (У-Б), Паужетка (Пжт), Семлячик (Смл). Летом 1962 г. к ним добавились станции на о-ве Беринга (Брн), Мильково (Млк), а в конце 1962 г., после включения КГГО и Лаборатории вулканологии АН СССР в новый Институт вулканологии (ИВ) Сибирского отделения АН СССР, в сеть во-

шли также три сейсмостанции, поставленные для наблюдений за Ключевской группой вулканов,— Ключи (Клч), Козыревск (Кзр), Апахончич (Апх). Эти 11 станций составили основу камчатской региональной сети, которая дополнялась в последующие годы.

Станции были оснащены однотипной короткопериодной аппаратурой с периодом маятников $T=1,2$ с, столообразной частотной характеристикой по смещению в диапазоне 1—20 Гц с увеличением $(5-10) \cdot 10^3$, максимум $30 \cdot 10^3$.

При определении координат очагов используются региональные скоростной разрез и годограф, построенные И. П. Кузиным и С. А. Федотовым [34]. По имевшимся данным глубинного сейсмического зондирования было известно, что толщина земной коры под Камчаткой равна в среднем 30 км. При изучении скоростного разреза мантии Курило-Камчатской дуги было установлено, что земная кора подстилается низкоскоростной мантией с $V_p=7,7-7,8$ км/с [34]. Эти цифры были использованы при расчете среднего регионального годографа. Скорости в верхней мантии под Камчаткой меняются в пределах 7,3—7,9 км/с [28, 35, 40] и могут повышаться под склоном глубоководного желоба, где расположена основная масса очагов землетрясений, поэтому невязки порядка 10—15 км вполне возможны на эпицентральных расстояниях около 400—500 км. Примерно такой величиной оценивается действительная средняя точность определения координат эпицентров камчатской региональной сетью [10].

Энергетическая классификация камчатских землетрясений производится по шкале $K_{S_{1,2}}^{\Phi_{0,8}} = \lg E$, Дж, где E — сейсмическая энергия короткопериодных S -волн [32]. $K_{S_{1,2}}^{\Phi_{0,8}}$ (в дальнейшем просто K) определяется для близких землетрясений на гипоцентральных расстояниях 0—850 км ($S-P=0-80$ с); точность $\pm 0,2$ в диапазоне классов 8—13. Главные соотношения с другими шкалами магнитуд и энергетических классов таковы:

$$K \simeq 1,5M_{LH} + 4,6, \quad (1)$$

$$K \simeq 2,0m_b + 2,1, \quad (2)$$

$$K \simeq K^{P_{0,8}} - 0,6, \quad (3)$$

M_{LH} — магнитуда, определяемая по поверхностным волнам в службе $ESSH$, m_b — магнитуда по объемным волнам, определяемая сейсмологической службой США, $K^{P_{0,8}}$ — наиболее распространенная в СССР энергетическая шкала Т. Г. Раутиан [23, 24]. На рис. 4, б показаны контуры, в которых камчатская сеть регистрирует без пропусков землетрясения $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$, или $m_b \geq 3,2$); $K \geq 9,5$ ($M \geq 3,2$, или $m_b \geq 3,7$). На Камчатке и в прилегающей части Тихого океана, вплоть до глубоководного желоба, регистрируются все землетрясения с уровня $M \geq 4$ [39].

За четверть века наблюдений, с ноября 1961 по 1986 г., был получен огромный однородный массив данных. Каталог землетрясений за 1926—1986 гг. насчитывает 40 560 событий. Годовые каталоги и описание сейсмичности за текущий год публикуются в ежегодниках «Землетрясения в СССР» [13]. Сейсмичность Камчатки за отдельные периоды детальных наблюдений (1965—1968, 1969—1972 гг.) рассматривалась в отдельных статьях [41, 42]. Отдельно изучались землетрясения сейсмофокального слоя за 20 лет наблюдений (1962—1981 гг.) [39].

В данной статье охарактеризована сейсмичность Камчатки и Командорских островов за время детальных наблюдений с 1962 по 1983 г.

Период наблюдений превышает 20 лет. Он был сравнительно спокойным — произошло только два больших землетрясения, афтершоки которых вызывали временное повышение уровня сейсмичности в зоне стыка Курило-Камчатской и Алеутской дуг. Это были Озерновское зем-

летрясение 22.XI.1969 г., $M=7,7$, $H=40$ км [43] и Усть-Камчатское землетрясение 15.XII.1971 г., $M=7,8$, $H=30$ км [11].

В целом детальные сейсмологические наблюдения 1961—1986 гг. настолько продолжительны и однородны, что с учетом распределения очагов больших землетрясений прошлых лет позволяют судить о долговременных чертах сейсмичности Камчатки и Командорских островов.

Размещение очагов землетрясений в 1962—1983 гг.

Последовательный ряд карт эпицентров и вертикальных разрезов иллюстрирует размещение очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов в 1961—1983 гг. (рис. 3—8).

На рис. 3 приведена карта эпицентров сравнительно сильных землетрясений 1962—1983 гг., которые имеют энергетический класс $K \geq 11,5$ ($M \geq 4,6$, или $m_b \geq 4,7$). Подобные землетрясения регистрируются мировой сетью сейсмостанций. Размеры кружков, отображающих эпицентры, равны размерам очагов землетрясений в масштабе карты. Оценка среднего радиуса очага сделана по среднемировой зависимости между магнитудой (классом) и радиусом, полученной Ю. В. Ризниченко [26], с учетом различия в шкалах K и K^{P64} . Такое изображение эпицентров позволяет представить объем пространства, охваченный сейсмическими подвижками за годы наблюдений.

Основная масса землетрясений и 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 ≤ 100 км). В более глубоких слоях мантии землетрясения происходят к западу от тихоокеанского побережья Камчатки, под Камчаткой и Охотским морем.

Большинство землетрясений региона происходит на глубине 0—100 км между восточным побережьем Камчатки и Курило-Камчатским глубоководным желобом. Это камчатское звено сейсмического пояса Курило-Камчатской островной дуги, которое имеет длину 800 км. В нем выделяется наиболее сейсмичная полоса, протягивающаяся вдоль Камчатки через крупные полуострова ее восточного побережья — Шилунский, Кроноцкий, Камчатский (см. рис. 3). Примечательна более слабая полоса землетрясений, протягивающаяся вдоль дна глубоководного желоба. Между этими полосами были рои землетрясений. Наиболее устойчивые среди них расположены к югу от п-ова Шилунский.

В области стыка Курило-Камчатского и Алеутского глубоководных желобов тихоокеанский сейсмический пояс поворачивает на юго-восток к Командорским островам. Здесь, под островами Беринга и Медным, глубже 100 км очагов не наблюдается.

Северное окончание курило-камчатского сейсмического пояса прослеживается вдоль западного побережья Берингова моря через п-ов Озерной и о-в Карагинский (см. рис. 3).

На самой Камчатке наиболее сильные землетрясения с глубиной очагов 0—100 км происходили вдоль крупных живых сбросов, обрамляющих Восточный хребет Камчатки в грабене р. Щапина и севернее нее (см. рис. 3).

Более полное и подробное представление о положении очагов, их связи с основными структурами и вулканическим поясом Камчатки дают послойные карты эпицентров для глубин 0—50, 51—100, 101—150, 151—200, 201—250 км (рис. 4). Они построены для землетрясений 1962—1982 гг. с $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$, или $m_b \geq 3,2$). Большинство этих землетрясений регистрируется только камчатской сетью сейсмостанций: основные станции сети и граница области, в которой регистрируются все землетрясения с $K \geq 8,5$, показаны на рис. 4, б. Программа для построе-

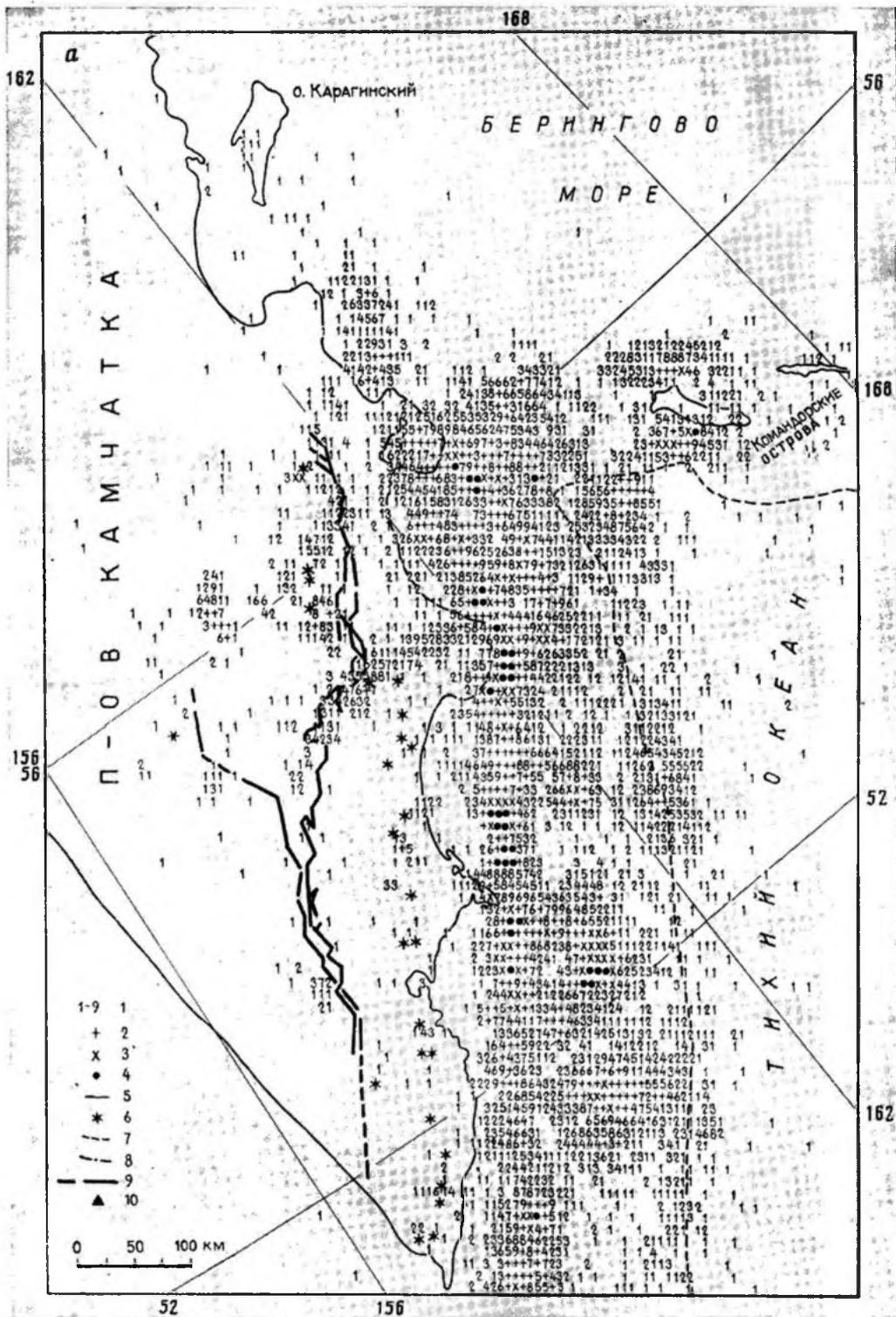


Рис. 4, а

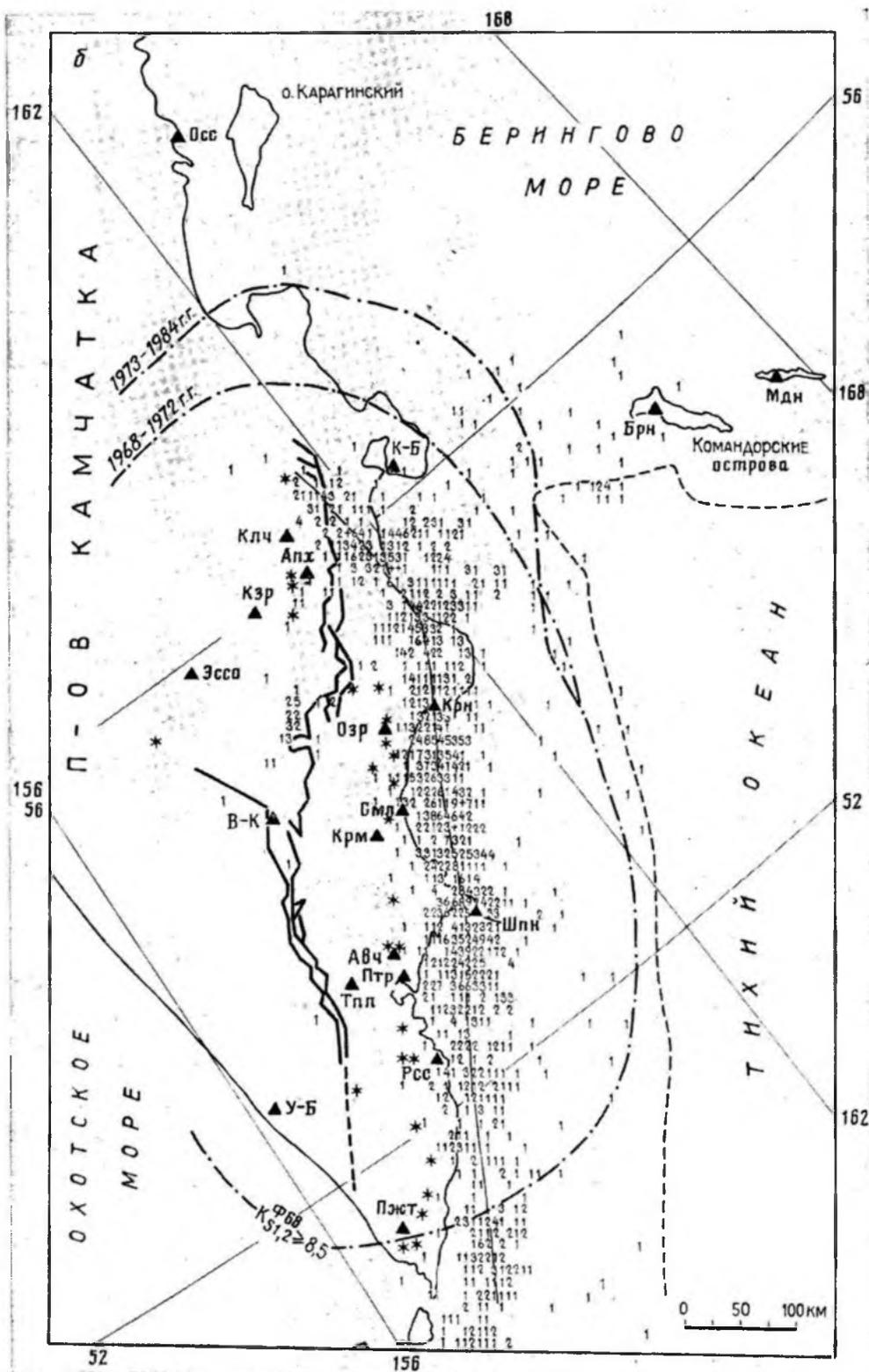


Рис. 4, б

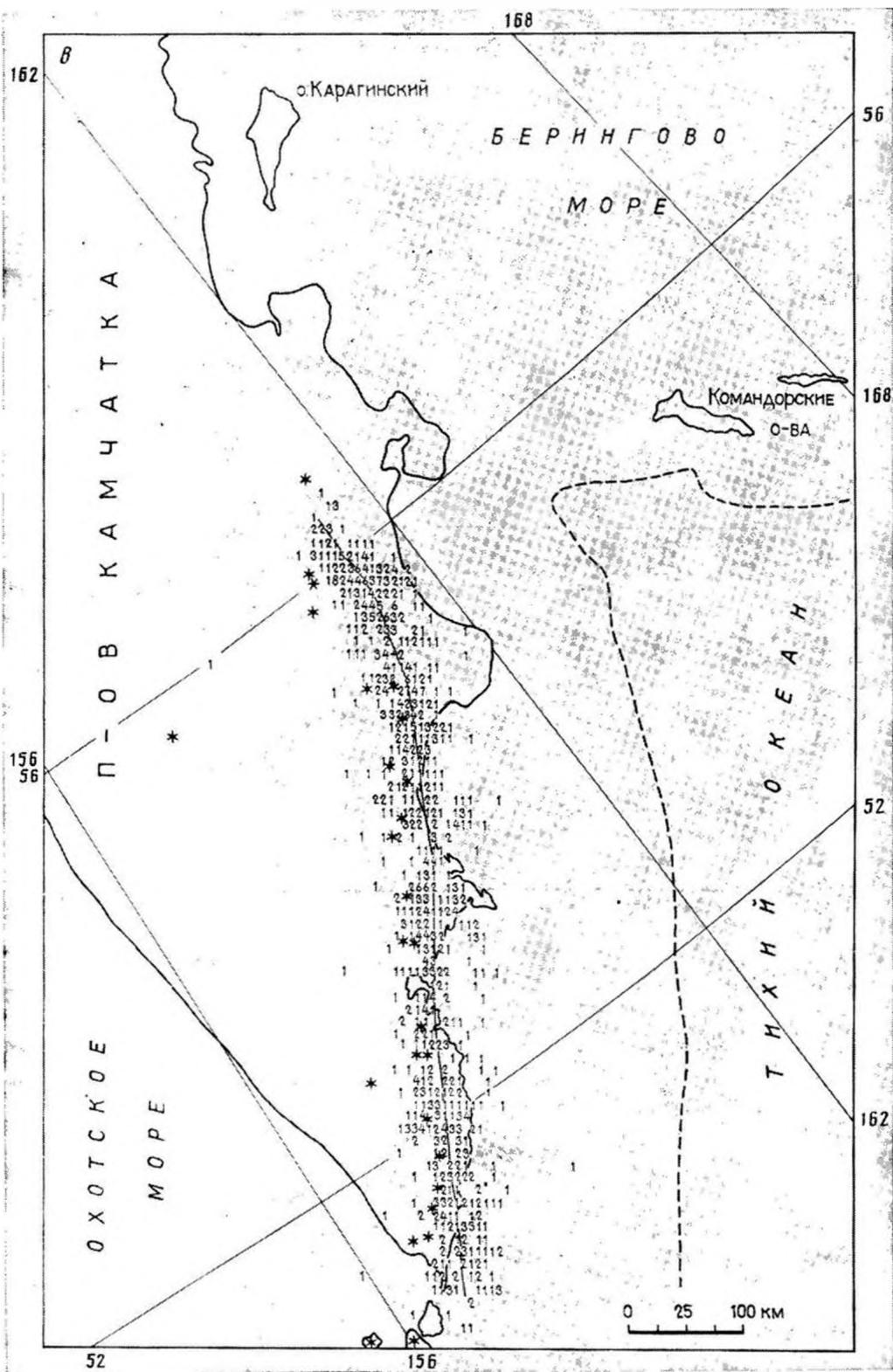


Рис. 4, в

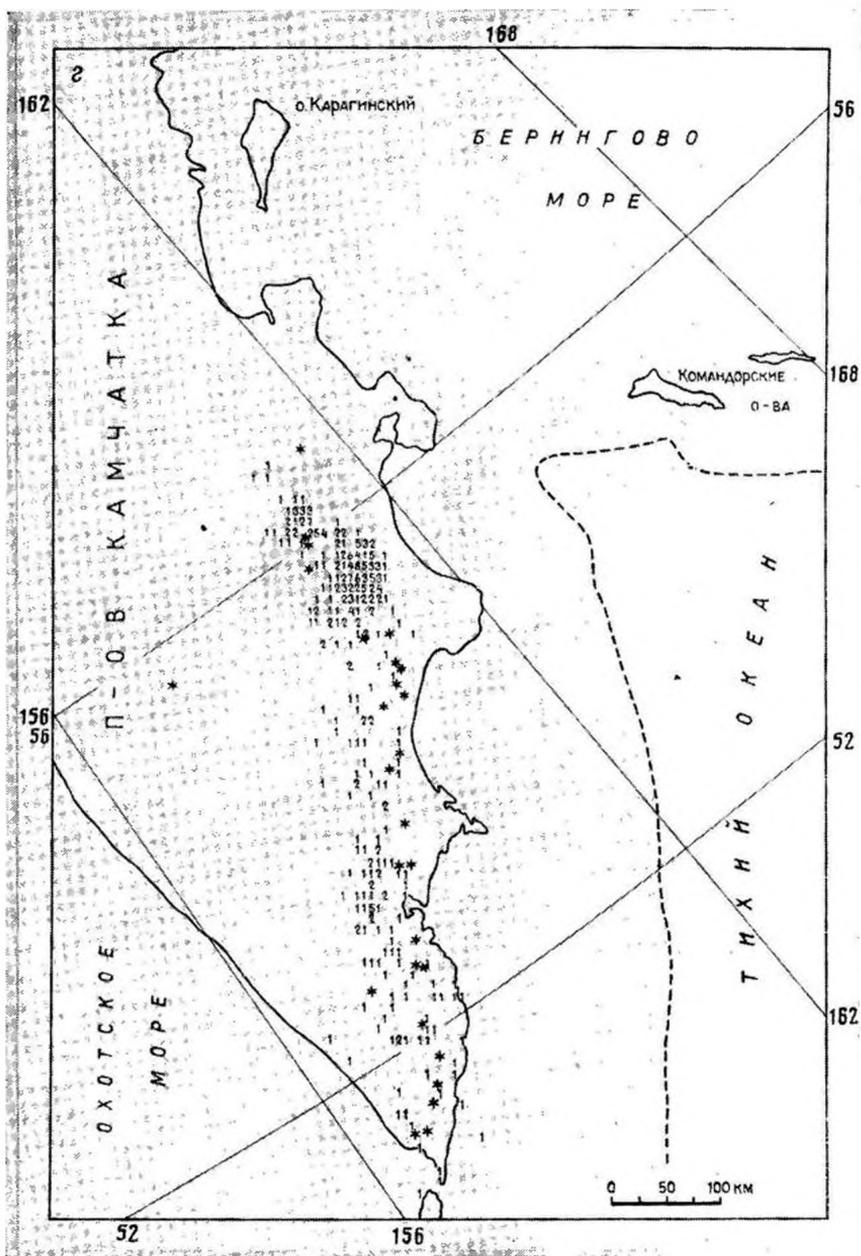


Рис. 4, г

ния карт и разрезов на ЭВМ была составлена А. А. Гусевым, З. М. Пономаревой и Г. В. Чернышевой.

Как можно видеть, сравнивая карты эпицентров для разных слоев (см. рис. 4), большинство землетрясений региона происходит в литосфере на глубинах 0—50 км — в земной коре, толщиной 20—40 км, и в прилегающей к ней части верхней мантии. Карта эпицентров землетрясений глубин 0—50 км (см. рис. 4, а) наиболее отчетливо иллюстрирует связи сейсмичности с тектоникой.

Мощной полосой шириной 200—250 км протягивается между восточным побережьем Камчатки и глубоководным желобом камчатское звено тихоокеанского сейсмического пояса. Здесь сейсмичность достига-

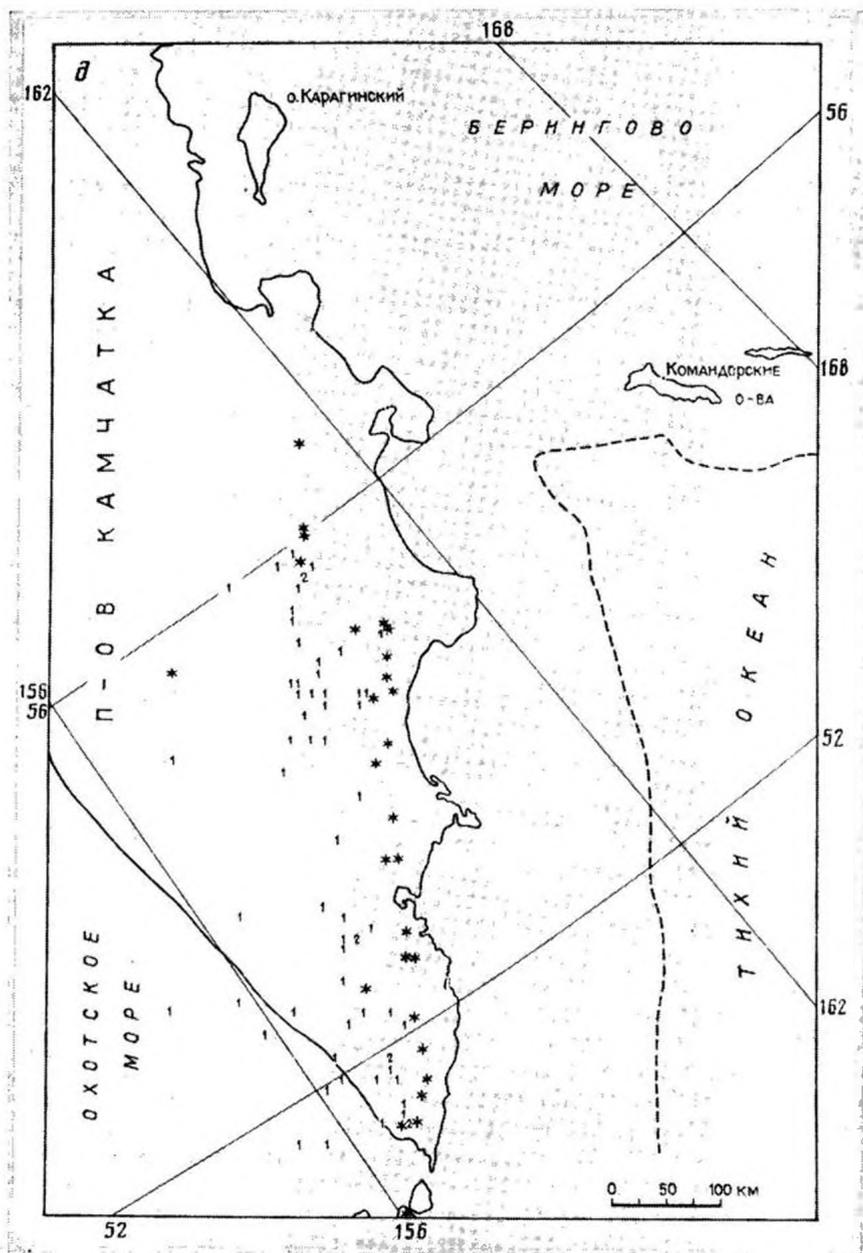


Рис. 4, а, б, в, г, д. Карты плотности эпицентров землетрясений $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$ или $t_b \geq 3,2$) за 1962—1982 гг. по слоям (км). а — 0—50; б — 51—100; в — 101—150; г — 151—200, д — 201—250. 1—4 — число землетрясений в прямоугольнике размером $6,25 \times 10,5$ км²: от 1 до 9; от 10 до 20; от 21 до 30; больше 30 соответственно; 5 — линия, соединяющая точки с максимальной плотностью; 6 — действующие вулканы; 7 — оси глубоководных желобов; 8 — контур надежной регистрации землетрясений $K \geq 8,5$; 9 — крупнейшие разломы [18], пунктир — предполагаемые; 10 — сейсмические станции

ет максимального уровня, существующего на Земле. Наиболее активен западный край, где сейсмофокальный слой (зона Вадати—Заварицкого—Беньоффа) начинает погружаться под Камчатку. Пояс раздвигается и его северная ветвь уходит в Берингово море и на северную Камчатку.

Для землетрясений Командорских островов примечательно то, что они окружают сравнительно малосейсмичный блок о-ва Беринга.

Под Камчаткой землетрясений существенно меньше, чем у ее берегов, в фокальной зоне. Здесь землетрясения связаны с тектоническими структурами земной коры меньшего по сравнению с фокальной зоной порядка.

Современные тектонические движения и живые разломы Камчатки изучены недостаточно. На карте (см. рис. 4, а) нанесены только некоторые крупные и хорошо выраженные в рельефе тектонические нарушения [18].

Землетрясения с глубинами до 100 км протягиваются полосами вдоль вулканического пояса, вдоль Восточного хребта и долинного грабена в верховьях р. Камчатки, а также вдоль южной части Срединного хребта (см. рис. 3; 4, а). Их сгущения видны в северном окончании пояса вулканов, где находятся Ключевская группа вулканов и вулкан Шивелуч, а также в Козыревско-Быстринском своде возле станции Эссо (см. рис. 4, а, б).

Очень интересна широтная полоса землетрясений, протягивающаяся от грабена р. Шапина к северной части Кроноцкого полуострова (см. рис. 3; 4, а). В этом месте происходят смещение на запад цепи вулканов и изгиб Курило-Камчатского глубоководного желоба в том же направлении. Этот тектонический узел, по-видимому, связан с взаимодействием Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг и заслуживает отдельного тщательного изучения.

Наибольшее по магнитуде коровое землетрясение Камчатки за время детальных наблюдений отмечено в Шапинском грабене в 1963 г., $M \approx 6$. В Козыревско-Быстринском своде магнитуда сильнейшего землетрясения равнялась 5,5 в 1962 г.

На глубинах 51—100 км (см. рис. 4, б) сейсмичность значительно ослабевает, зона существенно сужается (~75 км), линия максимальной плотности перемещается примерно на 40 км к западу, протягиваясь по основаниям восточных полуостровов Камчатки. К северу от п-ова Камчатский землетрясения на этих глубинах не происходят. Поворот на алеутское направление отмечается отдельными событиями. Зато отчетливо прослеживается поворот фокальной зоны от Кроноцкого полуострова на 40° к северу, в направлении вулкана Шивелуч. Западная граница фокальной зоны проходит по Восточному вулканическому поясу. Далее на запад, непосредственно под п-овом Камчатка эпицентры почти отсутствуют, за исключением некоторого числа землетрясений в районе Ключевской группы вулканов и Шапинского грабена.

Наиболее существенное, что вытекает из рис. 4, б,— срез сейсмофокального слоя Камчатки на глубинах 51—100 км и явно меньшая связь землетрясений этих глубин с блоковой тектоникой. В отличие от слоя 0—50 км лишь под крупнейшими живыми разломами Камчатки имеются землетрясения с глубинами очагов 51—100 км, образующие сгущение в районе уже отмеченного Шапинского грабена.

На глубинах 101—150 км (см. рис. 4, в) число землетрясений уменьшается, фокальная зона сужается еще более (~50 км), линия максимальной плотности подвинута далее на запад. Западная граница почти совпадает с вулканическим поясом. Поворот фокальной зоны на север от Кроноцкого полуострова прослеживается четко. К востоку и западу от фокальной зоны землетрясения отсутствуют. Единственное исключение представляет собой землетрясение, произошедшее под Срединным хребтом в районе последнего действующего вулкана — Ичинского (см. рис. 3; 4, в). Алеутское направление не прослеживается вовсе.

На рис. 4, в есть ряд примечательных совпадений: полоса очагов землетрясений сейсмофокального слоя на глубинах 101—150 км строго параллельна поясу действующих вулканов Камчатки и оси Курило-Кам-

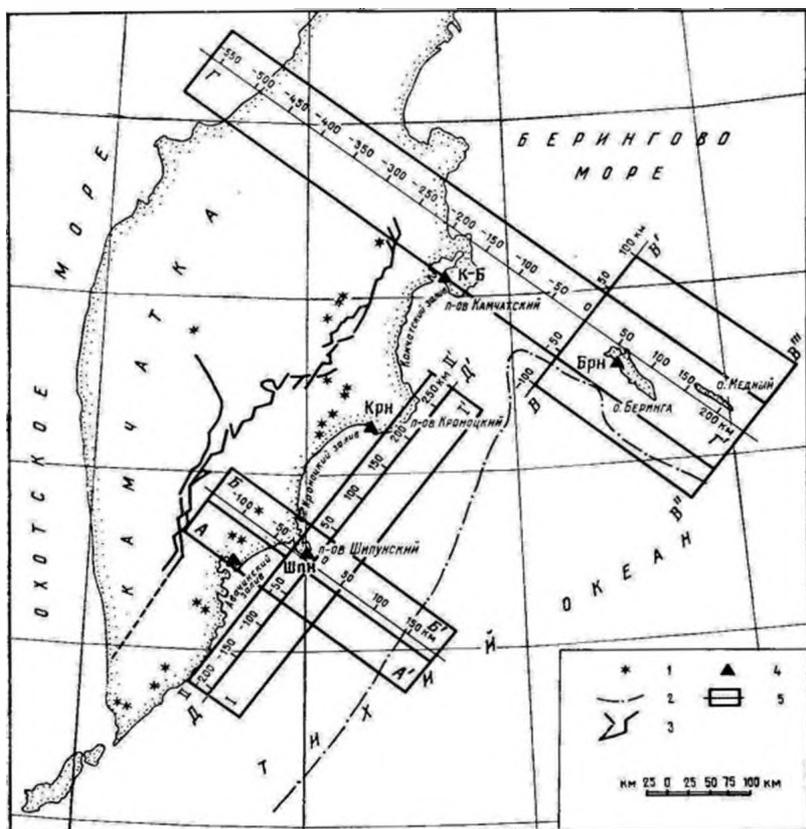


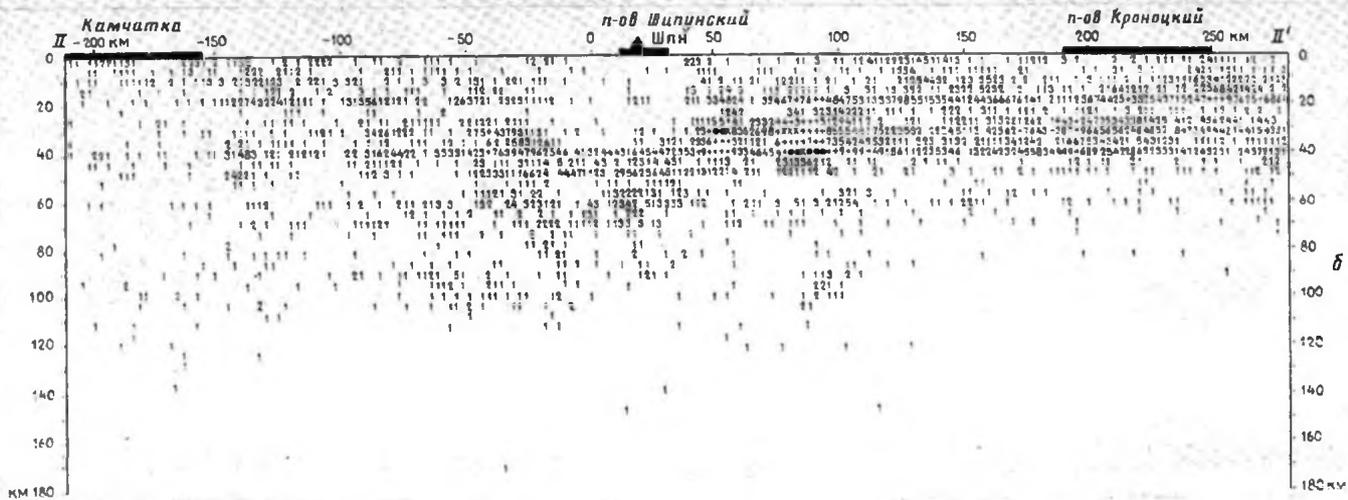
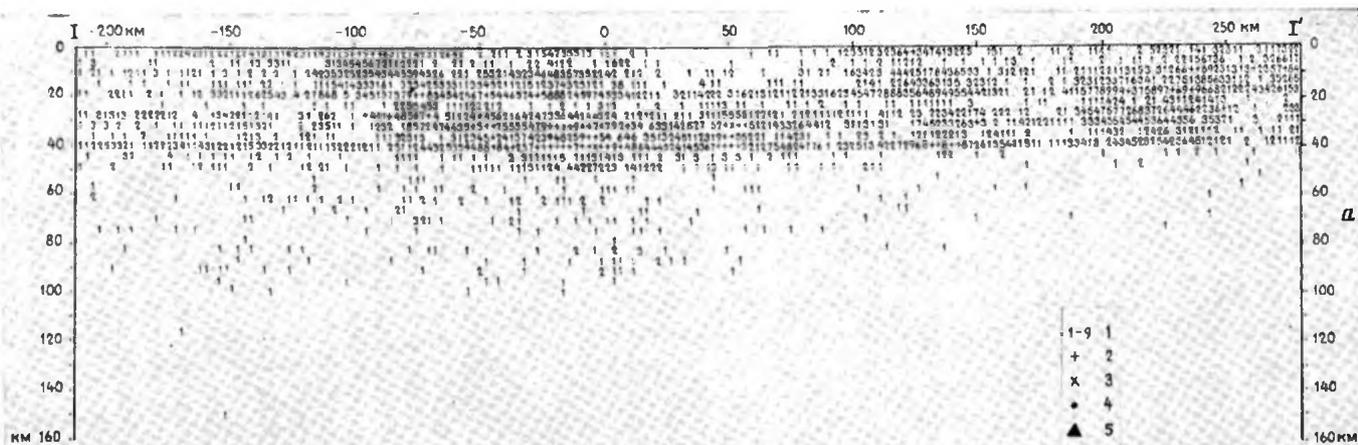
Рис. 5. Схема расположения участков и линий, по которым построены вертикальные разрезы фокальной зоны. 1 — вулканы; 2 — оси глубоководных желобов; 3 — крупные разломы [18], пунктир — предполагаемые; 4 — сейсмические станции; 5 — линии разрезов и границы участков, для которых построены разрезы

чатского глубоководного желоба; линия максимальной плотности гипоцентров глубин 101—150 км совпадает с западной границей пояса действующих вулканов. Рисунок 4, в — одно из наиболее очевидных доказательств существования связи между тектоническими процессами, приведшими к образованию глубоководного желоба, сейсмической деятельностью в сейсмофокальном слое на глубинах 101—150 км и возникновением пояса действующих вулканов островной дуги.

На глубинах 151—200 км продолжается уменьшение числа землетрясений (см. рис. 4, г). Землетрясения происходят только в сейсмофокальном слое. Он сдвинут далее на запад, вулканический фронт является уже восточной границей полосы землетрясений этого слоя. По-прежнему четко виден поворот северного края сейсмофокальной зоны на север, к вулкану Шивелуч.

На глубинах 201—250 км (см. рис. 4, д) фокальная зона представлена отдельными землетрясениями. Эпицентры еще дальше отодвинуты на запад. На севере фокальная зона обрывается у Ключевской группы вулканов. Появляются землетрясения под Охотским морем. Вне фокальной зоны землетрясения по-прежнему отсутствуют.

Ряд важных свойств размещения очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов виден на вертикальных разрезах. Схема расположения участков, для которых строились вертикальные разрезы, помещена на рис. 5. Два разреза построены вдоль сейсмофокального слоя Камчатки (полосы I—I' и II-II'), два — вкрест сейсмофокального слоя



Камчатки (полосы $A-A'$ и $B-B'$), один — для Командорских островов вкост алеутского простираия ($B-B'$) и один — для Командорских островов и Камчатки вдоль алеутского простираия ($\Gamma-\Gamma'$). Разрезы построены на ЭВМ по программе, составленной А. А. Гусевым, З. М. Пономаревой, Г. В. Чернышевой.

Продольные вертикальные разрезы вдоль сейсмофокального слоя Камчатки построены для двух полос длиной 500 и общей шириной 75 км, покрывающих его наиболее активную часть (рис. 6). Хорошо видно, что большинство землетрясений происходит здесь на глубинах 0—40 км. По мере приближения к Камчатке глубины очагов возрастают. Примечательной особенностью является пониженная сейсмичность под п-овом Шипуиным — крупной поперечной структурой Восточной Камчатки. То же уменьшение сейсмичности видно на поперечном разрезе (рис. 7, б). Менее уверенно прослеживается аналогичное уменьшение числа землетрясений под Кроноцким полуостровом. Для выяснения причин этого явления нужны дополнительные исследования.

В центре региона большое число станций и лучшее их расположение по отношению к очагам обеспечивают точность определения координат эпицентров и глубин выше средней. Это дало возможность построить поперечные вертикальные разрезы крупного масштаба по линиям AA' , BB' для этого участка фокальной зоны с целью более детального анализа ее внутренней структуры (см. рис. 7, а, б и рис. 5).

На поперечных разрезах отчетливо видно, что область максимальной сейсмичности — глубины 0—40 км. Полоса наибольшей плотности очагов на этих глубинах падает от желоба в сторону континента и смыкается с наклонной частью фокального слоя на глубинах 40—50 км (см. рис. 7, а, б).

На глубинах 50—150 км обнаруживается тенденция к двуслойному расположению очагов. Размер почти асейсмичной области между слоями превышает погрешность определения положения очагов. Аналогичная особенность в строении фокальной зоны впервые была отмечена для Японской дуги по данным о микроземлетрясениях [44, 45, 48, 49, 52, 53].

Разрезы на рис. 7, а, б очень интересны с точки зрения геодинамики и механизма глубинных процессов в области островных дуг. Наряду с этим они показывают положение области очага большого землетрясения, которое способно вызвать максимальные возможные сотрясения в Петропавловске-Камчатском, главном городе Камчатки, и дают независимые доказательства того, что сила землетрясений в Петропавловске-Камчатском может достигать 8—9 и 9 баллов (см. след. раздел).

На рис. 7 нанесено положение подошвы земной коры, положение гипоцентров и вероятные плоскости разрывов для трех последних сильнейших землетрясений, бывших в районе $AA'BB'$ (см. рис. 5): 4(5).XI.1952 г. с $M \approx 8,5$; 4(5).V.1959 г. с $M = 7,6-7,9$ и 24.XI.1971 г. с $M = 7,2$. Как показывает рис. 7, наиболее сейсмична верхняя часть сейсмофокального слоя, расположенная на глубинах 10—40 км, где слой изгибается и начинает погружаться под Камчатку, под островную дугу.

На рис. 8 показано расположение очагов землетрясений в районе Командорских островов — западного окончания Алеутской островной дуги, — и ближайшей к ним части Камчатки. На поперечном разрезе (см. рис. 8, а) видно, что фокальная зона у Командорских островов имеет ширину 150 км. 99% землетрясений происходит здесь на глубинах 0—50 км. Глубже 100 км землетрясения не наблюдались.

Продольный разрез вдоль полосы $\Gamma-\Gamma'$ (см. рис. 8, б) показывает расположение очагов землетрясений вдоль алеутского простираия. Эта

Рис. 6. Продольные разрезы фокальной зоны по линии I—I' (а) и II—II' (б). Землетрясения $K \geq 7,5$ ($M \geq 2$, или $m_b \geq 2,7$) за 1962—1981 гг. 1—4 — то же, что на рис. 4; 5 — сеймостанция

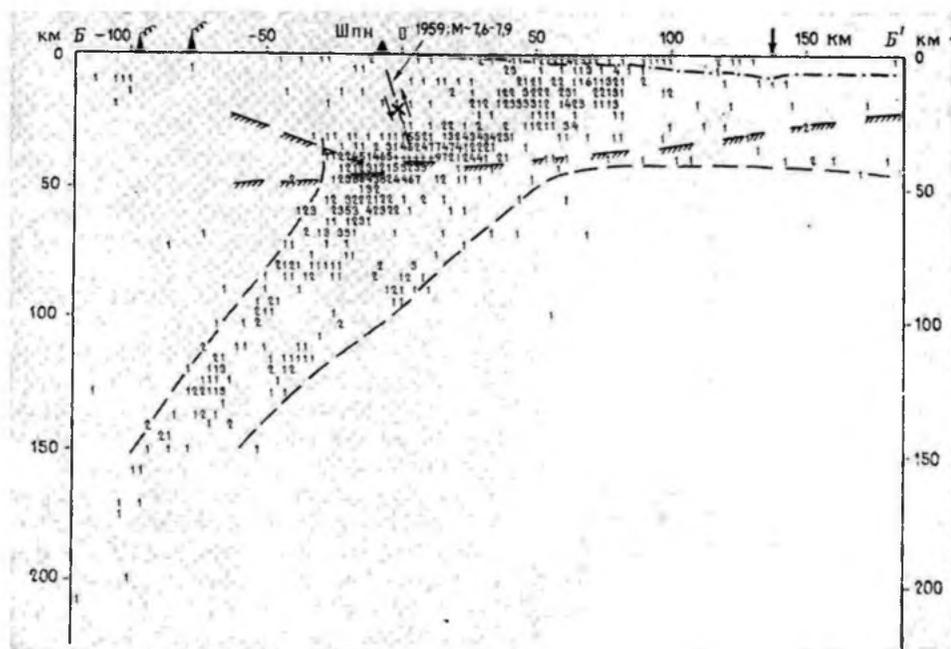
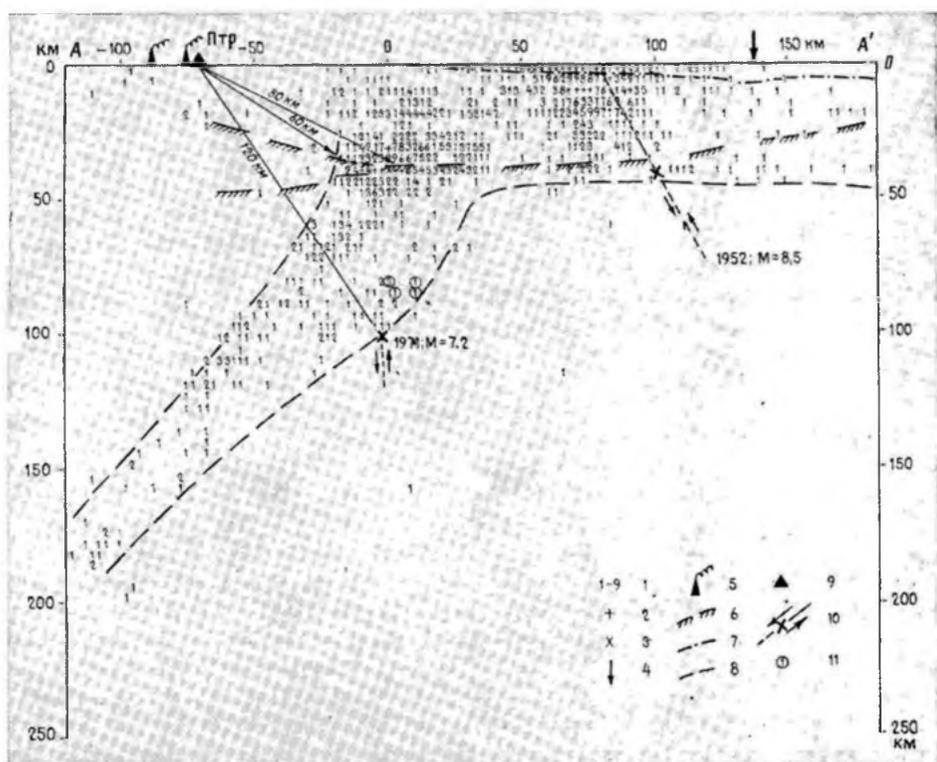


Рис. 7. Поперечные разрезы фокальной зоны для районов северной части Авачинского залива (А) и мыса Шипунского (Б). Землетрясения $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$ или $t_b \geq 3,2$) за 1962—1981 гг. 1—3 — то же, что на рис. 4; 4 — ось глубоководного желоба; 5 — вулканы; 6 — граница Мохоровичича [3]; 7 — рельеф морского дна; 8 — контур фокальной зоны; 9 — сейсмические станции; 10 — след плоскости подвижки и направление подвижки в очагах землетрясений 1971 г. с $M=7,2$ [1], 1959 г. с $M=7,6$ и 1952 г. с $M=8,5$ [52]; 11 — афтершоки землетрясения 1971 г.

полоса проходит через Командорские острова (расстояние 0—250 км вдоль $\Gamma-\Gamma'$, см. рис. 8, б), Камчатский пролив (расстояние от 0 до —150 км), п-ов Камчатский и Восточный хребет Камчатки (от 150 до —250 км), затем уходит за линию разломов в Камчатскую депрессию (250 км и далее). Пояс действующих вулканов Камчатки остается южнее полосы $\Gamma-\Gamma'$. Ближайший к полосе действующий вулкан — Шивелуч (Швл). Наибольшей сейсмичностью в полосе $\Gamma-\Gamma'$ обладают районы п-ова Камчатский с Камчатским проливом и о-ва Беринга. Сравнивая рис. 8, б с рис. 3 и 4, а, можно видеть, что первый район захватывает очень активную часть сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг и поворота тихоокеанского сейсмического пояса. Во втором районе высокая сейсмичность вызвана напряженной тектонической обстановкой. Остров Беринга находится на расстоянии всего 30—40 км от Алеутского глубоководного желоба, который достигает здесь максимальных глубин в своей западной части. Между о-вом Беринга и желобом находится один из наиболее крутых подводных склонов Тихого океана.

В полосе $\Gamma-\Gamma'$ землетрясения отсутствовали к западу от линии крупных четвертичных разломов и сбросов, отделяющих Восточный камчатский хребет от Центральной камчатской депрессии. Это свидетельствует о том, что современные контрастные движения, связанные со структурами алеутского простириания, продолжают на Камчатке на запад не далее Восточного камчатского хребта (см. рис. 3, 4, а, 5, 8, б).

Повторяемость землетрясений, сейсмическая активность, выделение сейсмической энергии на Камчатке в 1962—1983 гг.

В этом разделе приводится ряд основных характеристик сейсмической деятельности на Камчатке и Командорских островах, полученных в период детальных сейсмологических исследований в 1962—1983 гг.

На рис. 9 представлены графики повторяемости камчатских землетрясений. Графики I и II построены для всей сейсмоактивной территории региона ($\sim 1300 \times 650$ км²). График I соответствует наблюдениям удаленными станциями ($M=6-8$) (табл. 1), график II — детальным наблюдениям ($K=11-13$) (табл. 2).

Следует отметить хорошее согласование данных разномасштабных систем наблюдений, когда еще используются и различные шкалы оценок энергии.

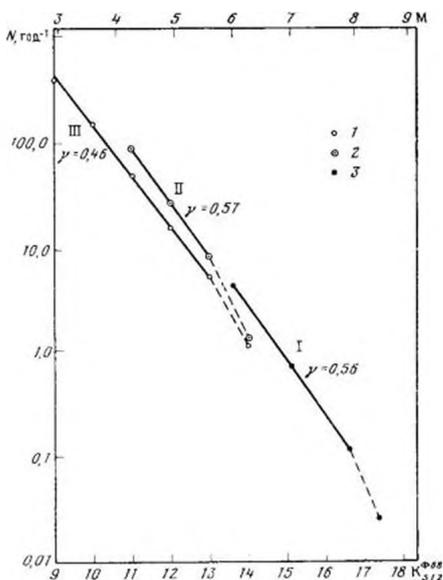
Графики I и II имеют одинаковый наклон $\gamma \approx 0,56-0,57$ в диапазоне $K=11-13$ и $M=6-7$ за существенно различные периоды времени. Наклон общего графика — $\gamma=0,52$. Примечательно совпадение уровней графиков I и II. Оно означает, что в спокойный период 1964—1980 г. на Камчатке происходило обычное, среднее число слабых землетрясений, хотя не было землетрясений с $M=8$.

Правый конец графика II отклоняется вниз, явно показывая, что в сравнительно спокойный период 1964—1980 гг. на Камчатке недоставало землетрясений с $K=14$ ($M=6$).

График III построен по данным детальных наблюдений 1964—1980 гг. и относится к площади размером около 750×400 км², которую охватывает контур надежной регистрации землетрясений классов $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$) (см. рис. 9, табл. 3 и рис. 4, б). В пределах этого контура все землетрясения с этого уровня регистрируются не менее чем тремя станциями. Так как контур охватывает только часть камчатского региона то, естественно, график III располагается ниже графика II (см. рис. 9). График III прямолинеен в интервале $K=9-13$, угол наклона $\gamma=0,46$. Так же как на графике II, аномально мало землетрясений класса $K=14$ ($M \sim 6-6,5$), что объясняется относительным сейсмическим затишьем в 1964—1980 гг.

Величина γ в представительных участках графиков повторяемости на рис. 9 меняется от 0,46 до 0,52. Статистически более обосновано значение $\gamma=0,46$ для землетрясений с $K=9-13$ ($M=2,6-5,9$). Из табл. 1 видно, что группирование землетрясений в этом интервале не искажает значение γ . За долговременную среднюю оценку наклона графика повторяемости камчатских землетрясений с глубинами очагов 0—100 км можно принять значение $\gamma=0,46$. Оно должно быть точным для слабых землетрясений, поэтому целесообразно пользоваться им при расчетах сейсмической активности с постоянным γ .

Рис. 9. Графики повторяемости камчатских землетрясений. 1 — среднегодовое число землетрясений $K \geq 8,5$ в контуре надежной регистрации землетрясений $K \geq 8,5$ по данным детальных наблюдений 1964—1980 гг.; 2 — среднегодовое число землетрясений $K \geq 11$ на всей площади региона по данным детальных наблюдений 1964—1980 гг.; 3 — среднегодовое число землетрясений $M \geq 6$ по данным инструментальных телесейсмических наблюдений 1899—1977 гг.



Разница в наклонах графиков I—III на рис. 7 могла быть вызвана не только различием в сейсмических процессах для сильных, средних и слабых землетрясений, но изменениями сейсмических процессов по площади. Такое предположение возникает потому, что графики I и II построены для всего камчатского региона, а III — лишь для его части.

Изменение величины γ по площади показано на карте (рис. 10), построенной для землетрясений с $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,6$) за 1963—1983 гг. в слое 0—100 км. В наиболее активной области, у восточного побережья Камчатки, в фокальной зоне $\gamma=0,45-0,5$, т. е. совпадает с наклоном графиков на рис. 9. Непосредственно на Камчатке $\gamma=0,5-0,7$, что свидетельствует об относительном возрастании количества слабых землетрясений. В глубоководном желобе, наоборот, относительно повышается число сильных землетрясений и $\gamma=0,35-0,5$. Изолинии γ в районе Командорских островов и к югу от Камчатки, где появляются значения 0,3—0,35, менее надежны из-за пропусков слабых землетрясений и поэтому проведены пунктиром.

Форма изолиний γ сложна. Общей закономерностью поля значений γ является уменьшение γ от Камчатки к глубоководному желобу и соответственно возрастание в том же направлении относительного числа сильных землетрясений.

Сейсмическая активность A_{10} является одним из наиболее удачных показателей интенсивности сейсмической деятельности. В нашем случае A_{10} — нормированное число землетрясений класса $K=10$ ($M=3,6$) с глубиной очага 0—100 км в год на площади 1000 км². Величина A_{10} почти близка к плотности эпицентров слабых землетрясений. На рис. 11 приведена карта A_{10} для Камчатки, построенная по данным детальных

Распределение землетрясений Камчатки по магнитуде M с глубиной очагов 0—100 км

M	Период наблюдений	Число зарегистрированных землетрясений	Число землетрясений в год
8,5	1899—1977 (78 лет)	2	0,0256
8 (7,5—8,4)	1899—1977 (78 лет)	9	0,1153
7 (6,5—7,4)	1899—1977 (78 лет)	56	0,7179
6 (5,5—6,4)	1924—1977 (54 г.)	222	4,1111

Примечание. Телесейсмические наблюдения, см. график 1 на рис. 9. $\gamma=0,56$.

Таблица 2

Распределение землетрясений Камчатки по энергетическим классам K за 1964—1980 гг. (17 лет); глубина очагов 0—100 км

K	Число зарегистрированных землетрясений	Число землетрясений в год
14 (13,5—12,6)	22	1,3
13 (12,5—13,4)	149	8,76
12 (11,5—12,4)	478	28,12
11 (10,5—11,4)	1497	88,06

Примечание. Детальные наблюдения региональной сетью, см. график 11 на рис. 9. $\gamma=0,57$.

Таблица 3

Распределение землетрясений Камчатки по энергетическим классам K за 1964—1980 гг. детальных наблюдений в контуре $K \geq 8,5$, глубина очагов 0—100 км, $\gamma=0,46$. График III на рис. 9

Число землетрясений	Класс K						
	9	10	11	12	13	14	15
Общее	6738	2589	871	276	83	19	3
За год	396	152	51	16,2	4,9	1,1	

Примечание. Землетрясения суммируются в интервалах $K \pm 0,5$, т. е. $K = 8,5-9,4$; $9,5-10,4$ и т. д.

наблюдений 1963—1983 гг. Значения A_{10} определялись на площадках 100×100 км с шагом 50 км. Карта строилась по методике Ю. В. Ризниченко [25].

Как показано на рис. 11, сейсмическая активность возрастает в 200 раз от центральной части Камчатки, где $A_{10} = 0,01$, к ее тихоокеанскому побережью, где $A_{10} = 1,0-1,9$. Изолиния $A_{10} = 1,0$ ограничивает полосу, под которой находится наиболее сейсмичная часть фокального слоя островной дуги. A_{10} уменьшается в несколько раз от максимальных значений по направлению к глубоководному желобу и Командорским островам, где $A_{10} = 0,1-0,5$. Примечательно устойчивое понижение сейсмической активности в области очага серии сильных землетрясений, происходивших в 1904 г. у берегов Южной Камчатки.

Соотношение между накоплением потенциальной сейсмической энергии и ее выделением на Камчатке в период детальных исследований в 1962—1983 гг. показано на карте D (рис. 12). D — мера сбрасывания сейсмической энергии, введенная в [29]:

$$D(t) = \frac{E_2(t)}{E_1} \quad (4)$$

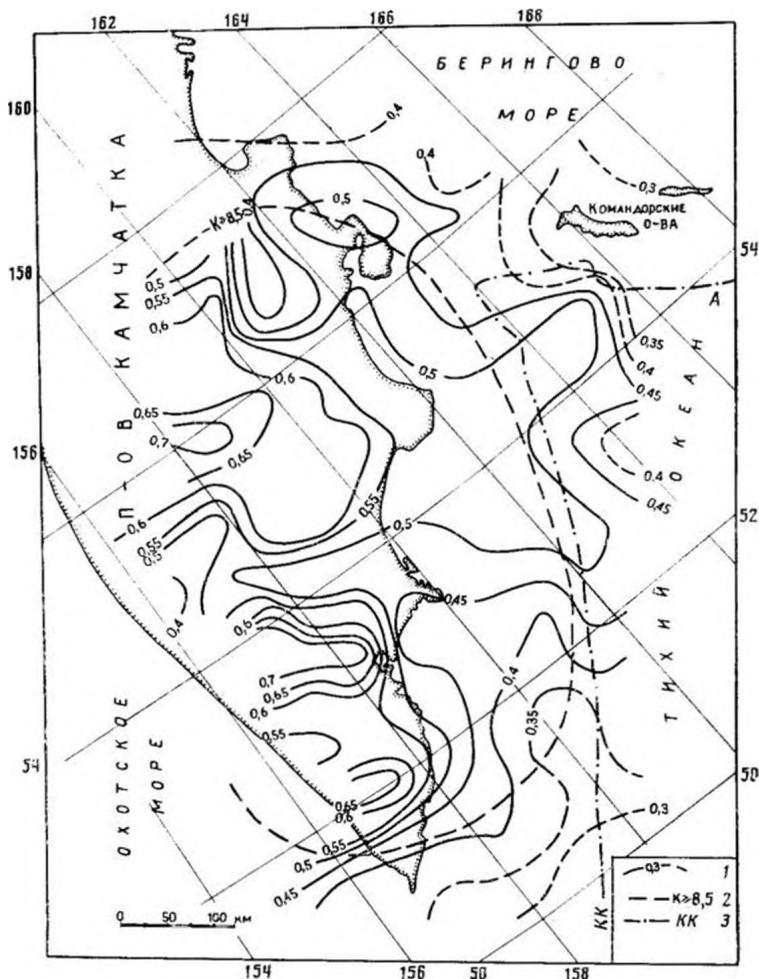


Рис. 10. Карта величины наклона графика повторяемости (γ) по землетрясениям за 1963—1983 гг. с глубинами очага 0—100 км для $K \geq 8,5$. Площадка осреднения 100×100 км², шаг 50 км; 1 — изолинии γ , пунктир — менее надежные; 2 — контур надежной регистрации землетрясений $K \geq 8,5$; 3 — оси желобов

$E_2(t)$ Дж/10³ км²год — удельная сейсмическая энергия землетрясений, наблюдавшихся в исследуемом районе за время t , а E , Дж/10³ км²год — средняя годовая сейсмическая энергия, выделяемая в регионе. Значение D рассчитаны для области размером 750×200 км, ограниченной рамкой на рис. 12. В ней в 1900—1985 гг. высвободилась суммарная сейсмическая энергия $\Sigma E = 64,4 \cdot 10^{16}$ Дж; средняя удельная величина выделяв-

Таблица 4

Влияние группирующихся землетрясений на наклон графика повторяемости

Число землетрясений	Класс К							γ
	9	10	11	12	13	14	15	
Общее	3728	1492	491	138	43	3	2	0,46
Без группирующихся	2540	1018	322	104	43	3	2	0,46

Примечание. Данные за 1964—1973 гг. в контуре надежной регистрации землетрясений $K \geq 8,5$, глубина очагов 0—100 км.

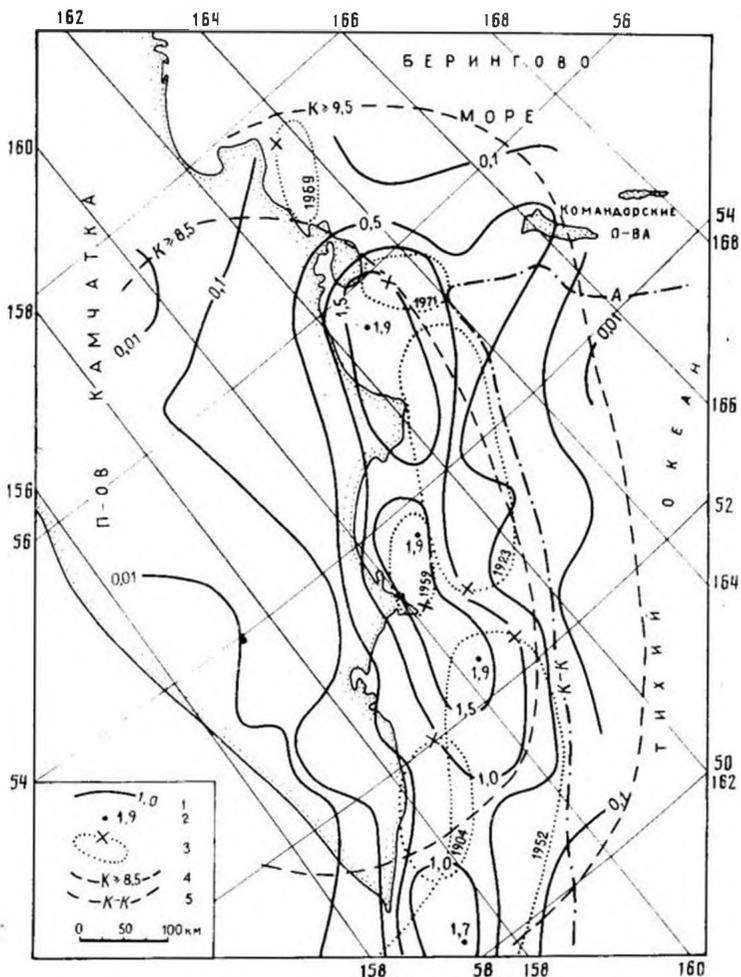


Рис. 11. Карта сейсмической активности A_{10} по землетрясениям за 1963—1983 гг. с $K \geq 8,5$; глубина очагов 0—100 мкм. 1 — изолинии A_{10} ; 2 — максимальные величины A_{10} ; 3 — инструментальный эпицентр и область афтершоков сильных землетрясений; 4 — контур надежной регистрации землетрясений указанного класса; 5 — оси желобов

шейся сейсмической энергии была $E_1 = 5,1 \cdot 10^{13}$ Дж/год $\cdot 10^3$ км; сейсмическая энергия была оценена по формуле

$$\lg E, \text{ Дж} = 1,5 M + 4,5. \quad (5)$$

Такое количество энергии выделяется при землетрясении с $M = 6,1$. Это значит, что сейсмическая энергия не накапливалась бы в рассматриваемой области в значительных количествах, если бы в ней ежегодно, на каждом участке площадью 10^3 км², происходило землетрясение с $M = 6,1$ ($K = 13,7$). Такой равномерной разрядки не происходит, энергия накапливается длительное время и почти вся высвобождается при сильных землетрясениях с $M \geq 7$.

Величина E , в рассматриваемой области меняется по площади [31]. В районе глубоководного желоба она в несколько раз меньше, чем в верхней части континентального склона, вдоль которой протягивается полоса с максимальной сейсмичностью (см. рис. 4, а, 11, и др.). Это вносит пропорциональные искажения в карту D , когда она рассчитывается с постоянной средней величиной E_1 , как это было сделано для рис. 12.

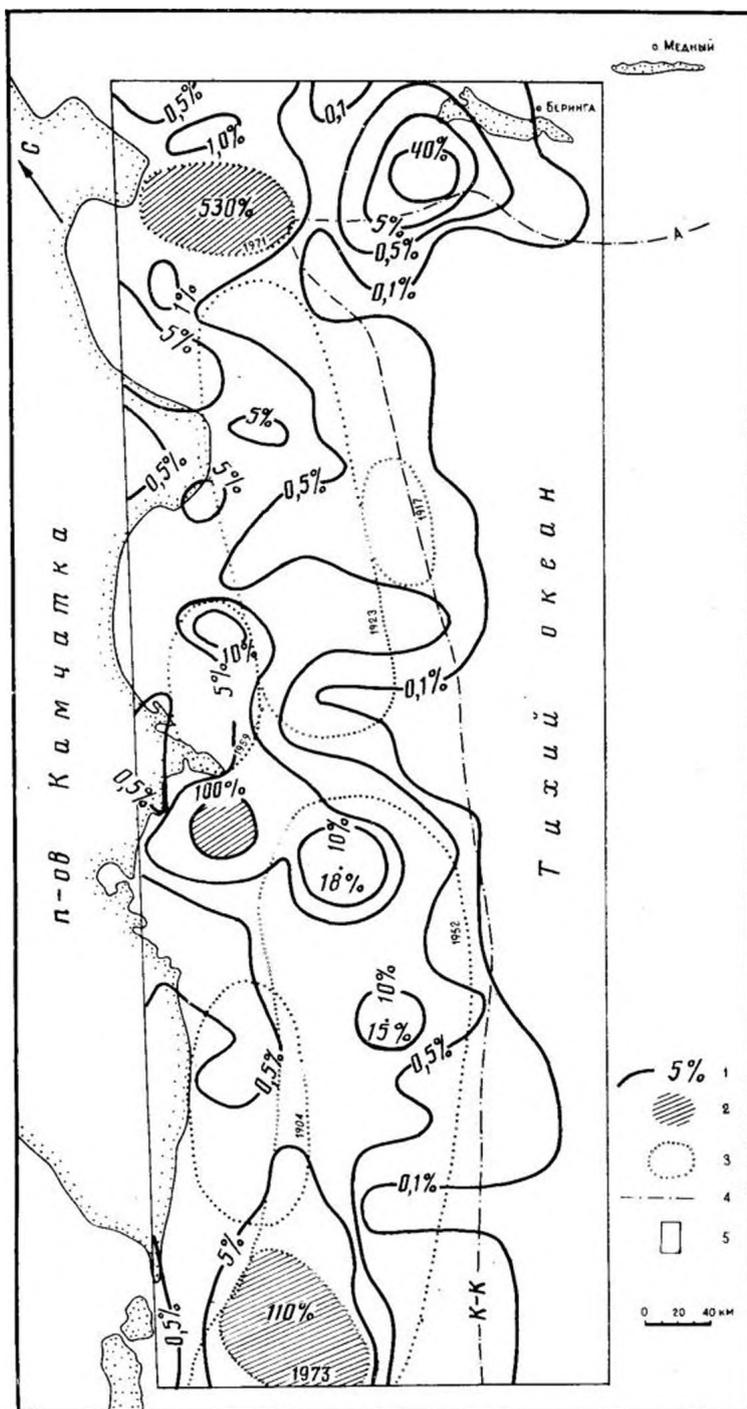


Рис. 12. Карта отношения сброшенной сейсмической энергии к накопленной (D) на Камчатке за 1962—1982 гг. 1 — изолинии D ; 2 — области, где сброс превышает 100%; 3 — границы афтершоковых областей сильных землетрясений; 4 — оси желобов; 5 — область подсчета D

Если бы при расчете D использовалось значение E_1 , меняющееся вкрест сейсмофокальной зоны, то величины D были бы в 2 раза меньше в полосе максимальной сейсмичности у побережья Камчатки и в несколько раз больше в районе глубоководного желоба, чем на рис. 12. Такие искажения сравнительно невелики, так как величина D меняется на 3—4 порядка.

Изолинии D построены для землетрясений 1962—1982 гг. и даны в процентах. При $D=100\%$ разрядка сейсмической энергии в течение рассматриваемого времени равна ее среднему накоплению за то же время. Как видно на рис. 12, выделение сейсмической энергии превосходило ее накопление только в областях очагов трех сильных ($M>7$) землетрясений 1971 и 1973 гг. Значительная разрядка напряжений (10—40%) произошла в роях землетрясений; располагавшихся возле о-ва Беринга, к северу и югу от п-ова Шипунский. На остальной площади рассматриваемой области $D<100\%$, т. е. на ней преобладало накопление сейсмической энергии.

Выделяется минимум $D=0,5\%$, расположенный южнее Петропавловска-Камчатского в Авачинском заливе и северной части области очага серии сильных землетрясений 1904 г. (см. рис. 2, 3, 12). Этот минимум окружен цпочкой максимумов D . Другой, менее резкий минимум D образован в районе Кроноцкого полуострова. Эти особенности важны для долгосрочного прогноза.

Итоги, сейсмическая обстановка, задачи

Сейсмический цикл больших землетрясений с $M\geq 7\frac{3}{4}$, в Курило-Камчатской островной дуге длится 140 ± 60 лет [31], поэтому представительные данные о сейсмичности Камчатки можно получить только при продолжительных наблюдениях. 25 лет детальных наблюдений на Камчатке были достаточно долгим временем для того, чтобы определить многие основные черты ее сейсмичности, выявить важные связи сейсмичности с другими явлениями и собрать данные, позволяющие решать необходимые научно-прикладные задачи. Часть основных фактов и результатов была кратко изложена выше.

Детальные исследования впервые дали точные сведения о расположении очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов, их связи с глубинным строением, тектоникой, геодинамикой и вулканизмом и т. д. Получены наиболее подробные в СССР данные о сейсмичности в области островной дуги, сейсмофокальной зоны Вадати—Заварицкого—Беньоффа, погружения литосферных плит и современной вулканической деятельности. Детальные данные о расположении очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов служат основой для многих других исследований. Среди них задачи долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного прогнозов сильных землетрясений.

Несомненно, что продолжение детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке пополнит, расширит и углубит наши знания о ее сейсмичности. При дальнейших исследованиях желательнее скорее восполнить ряд остающихся пробелов. Сравнительно плохо изучена сейсмичность глубоководного желоба, где из-за одностороннего расположения сейсмостанций низка точность определения глубины очагов. Нужны специальные исследования в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, Командорских островов и участка Алеутской дуги между Командорскими и Ближними Алеутскими островами, а также важного для понимания геодинамики продолжения курило-камчатского сейсмического пояса, уходящего на север вдоль побережья Берингова моря. Все еще скудны и недостаточно точны данные о связи сейсмичности с живыми разломами и современными движениями на самой Камчатке; здесь выделяется интересная поперечная полоса земле-

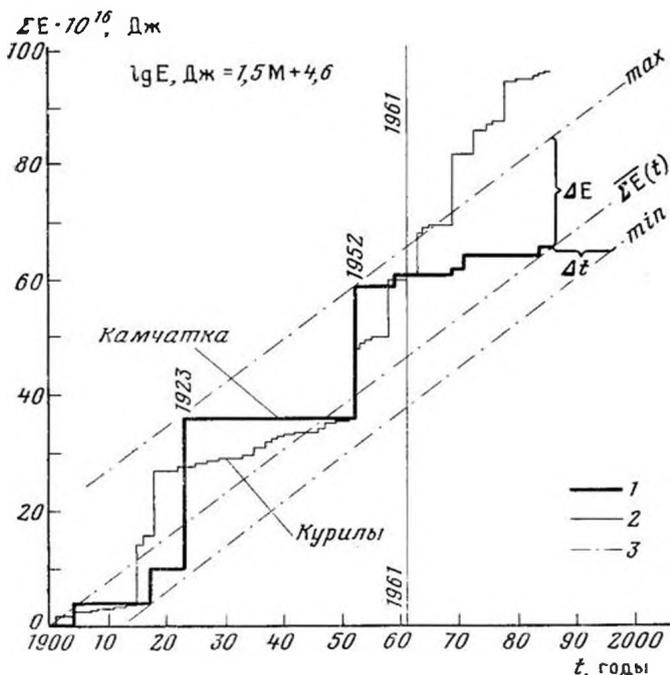


Рис. 13. Кумулятивная сейсмическая энергия $\Sigma E(t)$, высвобожденная при землетрясениях с $M \geq 6$, $H = 0-100$ км на Камчатке и Курильских островах в 1899—1986 гг. 1 — график для Камчатки; 2 — график для Курильских островов; 3 — средний, минимальный и максимальный уровни графика $\Sigma E(t)$ для Камчатки

трясений, тянущаяся от Шапинского грабена к северной оконечности Кроноцкого полуострова.

Размышляя о задачах на будущее, необходимо принимать во внимание ту сейсмическую обстановку, которая сложилась на Камчатке к концу 25-летнего периода детальных исследований. Обратимся к рис. 13. Кумулятивные графики сейсмической энергии, выделившейся в очагах землетрясений нашего века, с 1899 до июля 1986 г., построены отдельно для курильского и камчатского звеньев Курило-Камчатской островной дуги. Длина курильского звена — 1250, камчатского — 800 км. Поскольку почти вся сейсмическая энергия выделяется при землетрясениях с $M \geq 7$, то нет существенных пропусков землетрясений. Вертикальная линия отделяет период детальных наблюдений на Камчатке: 1961—1986 гг. Проведены средний график $\bar{\Sigma E}(t)$ для Камчатки и параллельные ему прямые *max* и *min*, ограничивающие полосу, в которой лежит график за время 1899 — июль 1986 гг.

Кумулятивные графики $\Sigma E(t)$ для Камчатки и Курильских островов в целом оказались близкими. Различие в ходе графиков за 1961—1986 гг. состоит в том, что на Камчатке в это время длилось относительное сейсмическое затишье, а на Южных Курилах с 1958 г. шла мощная серия землетрясений с $M \geq 7,7$. В 1899—1986 гг. на Курильских островах выделилось в среднем $\bar{E} = 1,11 \cdot 10^{16}$ Дж/год сейсмической энергии, а на Камчатке $\bar{E} = 0,74 \cdot 10^{16}$ Дж/год. Поделив эти значения на длину соответствующих звеньев дуги, получаем сейсмическую мощность на километр длины островной дуги: $\omega = 0,88 \cdot 10^{13}$ Дж/год·км дуги для Курильских островов и $\omega = 0,92 \cdot 10^{13}$ Дж/год·км дуги для Камчатки. Таким образом, в среднем в нашем веке сейсмическая мощность Камчатки была на 5% больше, чем Курильских островов. Столь небольшое различие подтверждает представление о том, что сейсмический процесс про-

текает примерно с одинаковой интенсивностью вдоль всей Курило-Камчатской дуги. Вероятно, также, что к настоящему времени с погрешностью менее 10% стало известно долговременное среднее годовое количество энергии, высвобождающейся в Курило-Камчатской дуге $\bar{E} = 1,80 \cdot 10^{16}$ Дж/год, что соответствует энергии землетрясения с $M \approx 7,8$. Средняя сейсмическая мощность на километр Курило-Камчатской дуги равна $\omega = 0,9 \cdot 10^{13}$ Дж/год·км дуги.

Сопоставление с сейсмическим циклом курило-камчатских и японских землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$ [31] также свидетельствует о том, что к настоящему времени могут быть определены устойчивые средние величины \bar{E} и ω . Продолжительность сейсмического цикла таких землетрясений 140 ± 60 лет. Длина Курило-Камчатской дуги составляет 2050 км, длина области очага с $M = 8$ равна приблизительно 150 км. При таких условиях весь объем данных наблюдений за курило-камчатскими землетрясениями 1899—1986 гг. равноценен наблюдениям в одном месте в течение 8—9 сейсмических циклов. Вероятно, что приведенные выше значения \bar{E} и ω уже являются представительными. Имеются в виду в первую очередь относительные значения этих величин. Их абсолютные значения зависят от применяемых формул $\lg E = f(M)$.

Для сравнения приведем аналогичные цифры для Японской дуги. Длина Японской островной дуги примерно 2000 км, из которых 1100 км приходится на наиболее активную в мире северо-восточную часть дуги и 900 км на менее сейсмичную юго-западную часть дуги. График $\Sigma E(t)$ и средняя для Японии величина $\bar{E} = 2,24 \cdot 10^{16}$ Дж/год приведены в книге К. Касахара [16], где для оценки энергии использовалось несколько другое соотношение $\lg E, \text{ Дж} = 1,5 M + 4,8$. Если же вместо него применить соотношение (5), то средняя сейсмическая мощность для всей Японии получается равной $\omega = 0,71 \cdot 10^{13}$ Дж/год·км дуги. Это примерно на 20% меньше, чем для более однородной Курило-Камчатской дуги. Японская и Курило-Камчатская островные дуги имеют почти одинаковую протяженность, 2000—1500 км. Их средние сейсмические мощности также близки, но в течение последнего века, в 1889—1986 гг., в Курило-Камчатской дуге высвободилось сейсмической энергии примерно на $\frac{1}{5}$ часть больше, чем в Японской.

Рисунок 13 позволяет сделать некоторые приблизительные оценки сейсмической обстановки на Камчатке. Если линия тах является верхним пределом для графика $\Sigma \bar{E}(t)$, то к настоящему времени на Камчатке накопилось приблизительно $2 \cdot 10^{17}$ Дж сейсмической энергии, т. е. энергия одного землетрясения с $M = 8,5$ или пяти землетрясений с $M = 8$. Если же линия тпн служит нижним пределом графика $\Sigma E(t)$, то сейсмическое затишье землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$, вряд ли продлится дольше, чем до 1995—2000 гг. Сравнительно спокойный период 1961—1986 гг., когда происходило обычное число слабых и средних землетрясений, с $M < 6$, но не было землетрясений с $M \geq 8$, может завершиться серией больших землетрясений.

Наиболее опасным среди них было бы большое землетрясение с очагом в ближайшей к г. Петропавловску-Камчатскому части сейсмофокального слоя. Этот вопрос затрагивался при обсуждении вертикальных разрезов вкост сейсмофокального слоя, представленных на рис. 7, а, б. На них нанесены гипоцентры и вероятные плоскости разрыва трех последних землетрясений, вызвавших в г. Петропавловске-Камчатском колебания силой 6,5—7,5 баллов. Данные об этих землетрясениях приведены в табл. 5.

Гигантское Камчатское землетрясение 4(5).XI.1952 г. охватило огромную область на континентальном склоне глубоководного желоба размерами 600×150 км². Очаг сильного землетрясения 4(5).V.1959 г. располагался на глубинах 0—50 км в месте изгиба сейсмофокального

Балл в г. Петропавловске-Камчатском при больших землетрясениях в районе Авачинского залива

Дата	M по [21]	Глубина инструментального гипоцентра h , км	Гипоцентральное расстояние до инструментального гипоцентра r , км	Длина области очага, L , км	I , балл
4 (5).XI.1952	$8,5 \pm 0,3$	10—40	170—180	600	6—7
4 (5).V.1959	$7,6 \pm 0,3$	20	110—120	100	7—8
24.XI.1971	$7,3 \pm 0,1$	100—112	120	30	7
?	~ 8		60—80	150	8—9, ~ 9

слоя. Сильное землетрясение 24.XI.1971 г. произошло в мантии на нижней границе сейсмофокального слоя (см. рис. 2, 3, 7, а, б). Гипоцентры этих землетрясений располагались не ближе 110—120 км от Петропавловска-Камчатского, поэтому их сила здесь не превысила 7—8 баллов. Наибольшую потенциальную опасность представляет собой очаг землетрясения с $M \approx 8$, которое произошло бы на глубине 10—50 км на гипоцентральном расстоянии 60—80 км от Петропавловска-Камчатского. В этом случае сила землетрясения может значительно превзойти 7—8 баллов.

Спадание балльности с расстоянием обычно удовлетворительно описывается соотношением

$$I = bM - v \lg r + c, \quad (6)$$

где I — сила землетрясения в баллах, M — магнитуа, r — гипоцентральное расстояние, b , v , c — постоянные. Величина $b = 1,5$, $v = 3,0—4,5$ (4,5 для Курильских островов) [21]. Воспользуемся этим соотношением, делая поправки на то, что его точность снижается вблизи очагов больших землетрясений (в этом случае на продолжительность, спектр и интенсивность колебаний влияют также размеры очага, направление вспарывания разрывов, глубина очага и др.). Если бы землетрясение 4(5).V.1959 г. произошло на расстоянии 60—80 км, а не 110—120 км, то его сила была бы на 0,7—1,0 балла больше. Если бы магнитуа землетрясения 4(5).V.1959 г. равнялась 8, то сила землетрясения тоже могла возрасти на 0,3—0,5 балла. Эти оценки показывают, что сила землетрясения с $M \approx 8$ может достигать 8,5—9 баллов в Петропавловске-Камчатском, если очаг будет находиться в Авачинском заливе на гипоцентральном расстоянии 60—80 км от него (см. табл. 5).

Приведенная оценка сейсмической обстановки показывает, что изучение хода и закономерностей сейсмического процесса на Камчатке, особенно в верхней части сейсмофокального слоя в Авачинском заливе, также должно входить в число основных задач дальнейших детальных сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах.

Среди самых интересных вопросов, которые предстоит изучать далее, находятся связи сейсмичности с активным вулканизмом и тектоникой. Данные детальных сейсмологических исследований об этих связях затрагивались при рассмотрении послонных карт эпицентров и разрезов и более подробно обсуждались в предыдущей работе, специально посвященной сейсмофокальному слою Камчатки [39]. Рисунки 3, 4, а—д, особенно рис. 4, в, подтверждают наши прежние выводы о том, что пояс действующих вулканов строго параллелен сейсмофокальному слою и протягивается над частью этого слоя, располагающейся на глубинах 150—175 км. Примечательны отдельные крупные вулканы, расположенные над более глубокой частью фокального слоя: Толбачик, Опала, Алаид (Тлб, Опл на рис. 3), и мощная вспышка вулканической деятельности в Ключевской группе вулканов, где в области сочленения с Але-

утской дугой заканчивается и круто поворачивает на север сейсмофокальный слой Курило-Камчатской дуги.

Ряд особенностей сейсмичности, в том числе продолжение в Берингово море сейсмического пояса Курило-Камчатской дуги и поворот северного окончания сейсмофокальной зоны Камчатки на север, в сторону от Алеутской дуги, не находит пока объяснения с позиций тектоники плит. Необходимы дополнительные данные о сейсмичности этого сложного тектонического узла, которые предстоит изучать вместе с данными о его стрессии, современных движениях, тепловом потоке и других.

В заключение авторы благодарят сотрудников Тихоокеанской сейсмической экспедиции ИФЗ АН СССР и Института вулканологии ДВНЦ АН СССР; в результате их большого и многолетнего труда был создан каталог камчатских землетрясений 1961—1986 гг., в котором содержатся основные исходные данные, использованные в представленной работе. Среди них благодарят руководителей групп обработки И. П. Кузина, А. М. Багдасарову, А. А. Годзиговскую, А. М. Кондратенко, Т. С. Лепскую, В. М. Зобина и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аптекман Ж. Я., Захарова А. И., Зобин В. М., Левшин А. Л. и др. Очаги камчатских землетрясений 1971 года//Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 12. С. 37—56.
2. Атлас землетрясений в СССР (1911—1956 гг.). М.: Изд-во АН СССР. 1962. 337 с.
3. Балеста С. Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М., 1981. 134 с.
4. Бюллетени сети сейсмических станций СССР за 1957—1961 гг. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 306 с.
5. Викулин А. В., Синельникова Л. Г. Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке//Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 102—106.
6. Горячев А. В. Камчатские землетрясения 4 мая и 18 июня 1959 года и геологические условия их возникновения//Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1960. № 11. С. 32—44.
7. Горячев А. В. Основные закономерности тектонического развития Курило-Камчатской зоны. М.: Наука, 1966. 235 с.
8. Горячев А. В., Кириллов Ф. А., Кондорская Н. В., Ландырцева Н. С., Федотов С. А. Сейсмическое районирование Камчатки и Курильских островов//Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 408—433.
9. Горячев А. В., Ершов И. А., Кириллов Ф. А., Кузин И. П., Лямзина Г. А., Медведев С. В., Попова Е. В., Федотов С. А., Штейнберг В. В. О сейсмическом микрорайонировании территории Петропавловска-Камчатского//Тр. ИФЗ АН СССР. 1963. № 28 (195). С. 3—61.
10. Гусев А. А. Ошибки определения параметров очага землетрясений Камчатки//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 66—81.
11. Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Шумилина Л. С. Усть-Камчатское землетрясение 15 декабря 1971 года//Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука, 1975. С. 172—184.
12. Дорошин П. Н. О некоторых вулканах, их извержениях и землетрясениях, бывших в американских владениях России. СПб.: Изд-во Российской АН, 1869.
13. Ежегодники: Землетрясения в СССР, 1964—1983 гг. М.: Наука, 1967—1986.
14. Землетрясения у берегов Камчатки в мае—июне 1959 г.//Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. № 11. 1960. С. 32—44.
15. Известия ПЦСК. 1912. Т. 4. Вып. 1. 129 с.
16. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
17. Крашенинников С. П. Описание земли Камчатки. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 251 с.
18. Мелекссцев И. В., Брайцева О. А., Эрлих Э. Н., Шанцер А. Е. и др. Камчатка, Курильские и Командорские острова//История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1974. 439 с.
19. Мушкетов И. В. Материалы для изучения землетрясений России//Изв. РГО. Т. 27. СПб., 1891; 1899. Вып. 1; 2; 35. 81 с.
20. Мушкетов И. В., Орлов А. П. Каталог землетрясений Российской империи//Зап. РГО. СПб. Т. XXVI. 1893. 582 с.
21. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. М.: Наука, 1977. 534 с.

22. *Перрей А.* Землетрясения на севере Европы и Азии//А. Купфер. Свод магнитных наблюдений. СПб., 1846.
23. *Раутиан Т. Г.* Энергия землетрясений//Методы детального изучения сейсмичности. Тр. ИФЗ АН СССР. 1960. № 9 (179). С. 75—113.
24. *Раутиан Т. Г.* Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км//Тр. ИФЗ АН СССР. 1964. № 32 (199). С. 88—93.
25. *Ризниченко Ю. В.* Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 7. С. 969—981.
26. *Ризниченко Ю. В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент//Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9—27.
27. *Саваренский Е. Ф., Тищенко В. Г., Святловский А. Е., Добровольский А. Д., Живаго А. В.* Цунами 4—5 ноября 1952 г.//Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1958. № 4. С. 107—113.
28. *Славина Л. Б., Федотов С. А.* Скорости продольных волн в верхней мантии под Камчаткой//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 188—198.
29. *Токарев П. И.* Извержение и сейсмический режим Ключевской группы вулканов. М.: Наука, 1966. 118 с.
30. *Федотов С. А.* Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии//Сейсмическое микрорайонирование. Тр. ИФЗ АН СССР. 1965. № 36 (203). С. 66—93.
31. *Федотов С. А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе//Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121—150.
32. *Федотов С. А.* Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
33. *Федотов С. А., Багдасарова А. М.* Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 1897—1961 гг. по данным инструментальных наблюдений//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 7—34.
34. *Федотов С. А., Кузин И. П.* Скоростной разрез верхней мантии в области Южных Курильских островов//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1963. № 5. С. 670—686.
35. *Федотов С. А., Славина Л. Б.* Оценка скоростей продольных волн в верхней мантии под северо-западной частью Тихого океана и Камчаткой//Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1968. № 2. С. 8—31.
36. *Федотов С. А., Шумилина Л. С.* Развитие сейсмологических наблюдений на Камчатке//Проблемы современной сейсмологии: Голицынские чтения, 1981 г. М.: Наука, 1985. С. 71—86.
37. *Федотов С. А., Кузин И. П., Бобков М. Ф.* Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961—1962 гг.//Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 9. С. 1360—1375.
38. *Федотов С. А., Багдасарова А. М., Бобков М. Ф., Кузин И. П.* Землетрясения Камчатки и Командорских островов по данным детальных сейсмологических наблюдений за период ноябрь 1961—1963 гг.//Землетрясения в СССР в 1963 году. М.: Наука, 1966. С. 167—194.
39. *Федотов С. А., Гусев А. А., Чернышева Г. В., Шумилина Л. С.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов в ней, связь с вулканизмом)//Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91—107.
40. *Федотов С. А., Славина Л. Б., Шумилина Л. С., Гусев А. А.* Скорости продольных волн в верхней мантии под Камчаткой//Сейсмичность и глубинное строение Сибири и Дальнего Востока. Владивосток, 1976. С. 180—189.
41. *Федотов С. А., Токарев П. И., Годзиковская А. А., Зобин В. М.* Детальные данные о сейсмичности Камчатки и Командорских островов (1965—1978 гг.)//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 35—46.
42. *Федотов С. А., Токарев П. И., Кондратенко А. М., Феофилактов В. Д.* Сейсмичность Камчатки в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг в 1969—1972 гг.//Вулканизм островных дуг. М.: Наука, 1977. С. 7—13.
43. *Федотов С. А., Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Чепкунас К. Е.* Озерновское землетрясение и цунами 1969 г.//Землетрясения в СССР в 1969 году. М.: Наука, 1973. С. 195—208.
44. *Хасегава А., Умино Г., Такаги А.* Двухплоскостная структура глубинной сейсмической зоны в северо-восточной части Японской дуги//Матер. III Советско-японского симпозиума по геодинамике и вулканизму зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. Южно-Сахалинск, 2—7 октября 1976 г. Новоалександровск, 1976. Тез. докл. Вып. I. С. 17—18.
45. *Хасегава А., Умино Г., Такаги А.* Двуслойная структура глубинной сейсмической зоны островной дуги северо-восточной Японии//Новые данные о строении коры и верхней мантии Курило-Камчатского и Японского региона. Матер. III Советско-японского симпозиума по геодинамике и вулканизму зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. Владивосток, 1978. С. 68—75.

46. Черных Г. П. Землетрясение у берегов Камчатки 4 мая 1959 г.//Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1960. № 11. С. 45—50.
47. Gutenberg B. Great earthquakes 1896—1903//Trans. Amer. Geophys. Union. 1956. V. 37. № 5.
48. Engdahl E. R. Relocations of intermediate depth earthquakes in the Central Aleutians by seismic ray tracing//Nature. 1973. V. 245. P. 23—25.
49. Hasegawa A., Umino N., Takagi A. Double-planed structure of the deep seismic zone in the north-eastern Japan Arc//Tectonophysics. 1978. V. 47. № 1/2. P. 43—58.
50. Perrey A. Documents sur les tremblements de terre et les phenomenes volcaniques dans l'archipel les Kuriles et an Kamchatka//Ann. Soc. d'agriculture et arts utiles. Lyon, 1864. v. 8.
51. Summary of earthquake focal mechanisms for the western Pacific-Indonesian region, 1929—1973. Published by World Data Center A for Solid Earth Geophysics. March, 1977.
52. Suzuki S., Sasatani T., Motoya Y. Double seismic zone beneath the middle of Hokkaido, Japan, in the southwestern side of the Kurile arc//Tectonophysics. 1983. V. 96. № 1/2. P. 59—76.
53. Tsumura K. Microearthquake activity in the Kanto District//Publ. for the 50th Anniversary of the Great Kanto Earthquake (1923). 1973. P. 67—87.

Институт вулканологии
ДВО АН СССР

Поступила в редакцию
27.VI.1987

Институт физики Земли АН СССР
