

УДК 550.348.436

ЗОБИН В. М., ФЕДОТОВ С. А., ГОРДЕЕВ Е. И.,
ГУСЕВА Е. М., МИТЯКИН В. П.

СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА КАМЧАТКЕ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВАХ В 1962—1986 гг.

LARGE EARTHQUAKES IN KAMCHATKA AND COMMANDER ISLANDS IN 1962—1986, by Zobin V. M., Fedotov S. A., Gordeev E. I., Guseva E. M. and Mityakin V. P. This paper considers the effects associated with 6 large earthquakes with $M=6,9-7,8$ that occurred between 1962 and 1986. Energy classes and focal mechanism of earthquakes, macroseismic effect and spectra of acceleration are analyzed. A process of formation of a focal zone of large earthquakes in the course of aftershock activity is described. General characteristics of formation of large earthquake foci are considered.

(Received September 9, 1986)

Institute of Volcanology, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

Введение

1 ноября 1961 г. начались детальные сейсмологические исследования на Камчатке и Командорских островах. За минувшие 25 лет было зарегистрировано более 40 тыс. сейсмических событий различного энергетического уровня. Шесть из них имели магнитуду $M=6,9-7,8$ и ощущались силой шесть и выше баллов на значительной территории п-ова Камчатка. Основные данные для этих землетрясений приведены в табл. 1, эпицентры показаны на рис. 1. Магнитудный интервал 6,9—7,8 не является максимальным для Камчатско-Командорского региона: за период с 1737 г. здесь произошло шесть землетрясений с магнитудой выше 8,0 [15]. Поэтому прошедшие четверть века сейсмической истории Камчатки можно считать спокойным временем. В то же время изучение землетрясений с магнитудой между 7 и 8 имеет существенное значение для уточнения представлений о процессах в очагах землетрясений, для отработки методики организации наблюдений в эпицентральной зоне сильных землетрясений и оценки параметров землетрясений Камчатки и Командорских островов.

Каждое из сильных землетрясений последних 25 лет было по-своему примечательным.

Первое из серии — Озерновское-22 (23).XI 1969 г. было сильнейшим землетрясением этого века на западе Берингова моря. Подвижка в его очаге привела к возникновению интенсивной волны цунами высотой до 5—10 м на пустынном берегу северной части залива Озерной, причем в устье р. Ольховая волна выросла до 12—15 м. Ввиду малой населенности берега серьезного ущерба волна цунами не принесла.

Для жителей Петропавловска-Камчатского памятно землетрясение 24(25).XI 1971 г. В городе оно ощущалось силой от пяти до восьми баллов в зависимости от грунтовых условий. Тщательное изучение макросейсмического эффекта позволило проверить и уточнить карту сейсмического микрорайонирования города. Следует отметить отсутствие

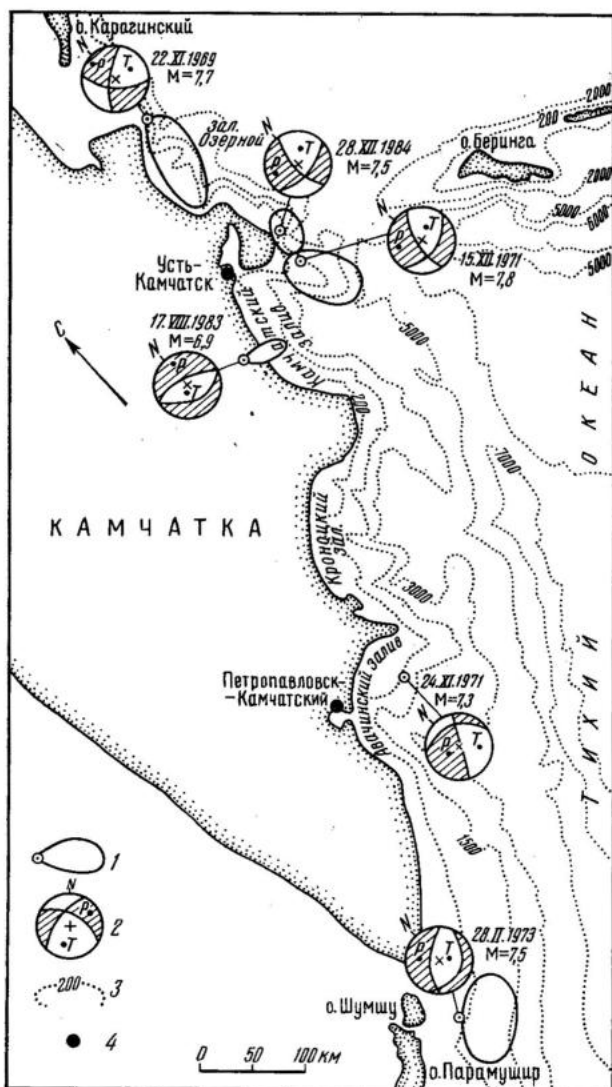


Рис. 1. Схема эпицентров и диаграммы механизма очагов сильных камчатских землетрясений. 1 — эпицентр и очерта- ния очаговой зоны землетрясения; 2 — диаграмма механизма очага в проекции на верхней полусфере сетки Вульфа (P — ось напряжения сжатия, T — растяжения); 3 — изобата, м; 4 — населенный пункт

жертв среди населения и сравнительно небольшие повреждения зданий и сооружений.

Усть-Камчатское землетрясение 15.XII 1971 г. было самым сильным событием 25-летнего интервала ($M=7, 8$). Оно примечательно тем, что это было первое предсказанное землетрясение на Камчатке. Его эпицентр располагался в месте, отведенном ему долгосрочным сейсмическим прогнозом С. А. Федотова [22, 24]. Усть-Камчатское землетрясение, как и последовавшее за ним Северо-Курильское землетрясение 28.II 1973 г., вызвало небольшую (до полуметра) волну цунами.

Камчатское землетрясение 17.VIII 1983 г. произошло в центре излучины побережья Камчатского залива на глубине 98 км. Район и вероятные месяцы этого землетрясения были предсказаны в феврале 1983 г., благодаря чему была проверена готовность к цунами, а в рай-

Таблица 1

Основные данные о сильных землетрясениях

Дата	Время в очаге, час. мин.	Координаты гипоцентра			Энергетический класс		Магнитуда				
		с. ш.	в. д.	глубина, км	К	К*	M_{LN}	M_S	m_{pv}	m_b	$M_{макр}$
1969 XI 22	23 09	57,70	163,50	25	14,1	—	7,7	7,3	7,4	6,3	6,7
1971 XI 24	10 35	52,77	159,66	100	—	16,0	7,3	—	6,7	6,3	7,1
1971 XII 15	08 29	55,85	163,35	25	15,0	14,7	7,8	7,8	7,4	6,1	6,8
1973 II 28	06 07	50,40	156,70	70	14,9	—	7,5	7,2	7,2	6,3	6,7
1983 VIII 17	10 55	55,64	161,52	98	15,0	16,4	6,9	—	6,5	6,6	6,7
1984 XII 28	10 37	56,17	163,50	19	14,2	—	7,5	7,0	6,5	6,2	5,7

Примечание. Оценки времени в очаге, координат гипоцентра и энергетического класса приведены по данным определений Института вулканологии ДВНЦ АН СССР (для землетрясения 28.II.1973 г. координаты гипоцентра приведены по данным ИМГиГ ДЕНЦ АН СССР); магнитуды M_{LN} для землетрясений 1—4 — по данным [15], 5, 6 — по [19]; магнитуды M_S , m_{pv} , m_b землетрясений 1—5 по Бюллетеню Международного сейсмологического центра; для землетрясения 6 по Earthquake Data Reports, № 12—84; $M_{макр}$ — по формуле (2) из работы [25]; К* — оценка по результату деконволюции записей сильных движений.

оне эпицентра заранее поставлены автоматические сейсмостанции и начаты точные геодезические измерения. Перед землетрясением в его эпицентральной области были зарегистрированы примечательные деформации земной поверхности, которые позволили наметить новые подходы к проблеме краткосрочного прогноза сильных землетрясений [16].

Последним в серии сильных событий явилось Камчатское землетрясение 28.XII 1984 г., эпицентр которого располагался восточнее п-ова Камчатского мыса. Впервые на Камчатке была получена запись акселерограммы в 10 км от инструментального эпицентра землетрясения с $M=7,5$.

Общие описания этих землетрясений даны в статьях [4, 5, 12, 13, 16, 27], отдельные аспекты рассматривались в работах [1, 2, 6—10, 14, 29 и др.]. Цель нашей статьи — проведение с единых позиций совместного анализа макросейсмических проявлений, процессов в очагах, афтершоковой активности рассматриваемой серии землетрясений, уточнение их геотектонической позиции. Специально для данной статьи проведено переопределение энергетического класса и механизма очагов землетрясений.

Общая характеристика очагов сильных землетрясений

Рассматриваемые шесть сильных землетрясений 1962—1986 гг. произошли в два достаточно коротких временных интервала. Первый интервал продолжался с ноября 1969 г. по февраль 1973 г. и включал четыре события с $M=7,7$; 7,3; 7,8 и 7,5. Второй длился с августа 1983 г. до декабря 1984 г. и содержал два землетрясения с $M=6,9$ и 7,5.

Очаговые зоны сильных землетрясений захватили существенную часть сейсмоактивной полосы восточного побережья Камчатки от зал. Озерный на севере до южной оконечности п-ова Камчатка. Три очага на севере региона расположены в пределах земной коры, на глубинах 20—40 км; три более южных очага — в верхней мантии, на глубинах 70—100 км.

Группа Р-волн сильных землетрясений и специфика развития их очагов. Развитие процесса в очагах шести сильных землетрясений Камчатско-Командорского региона проходило существенно различно; это

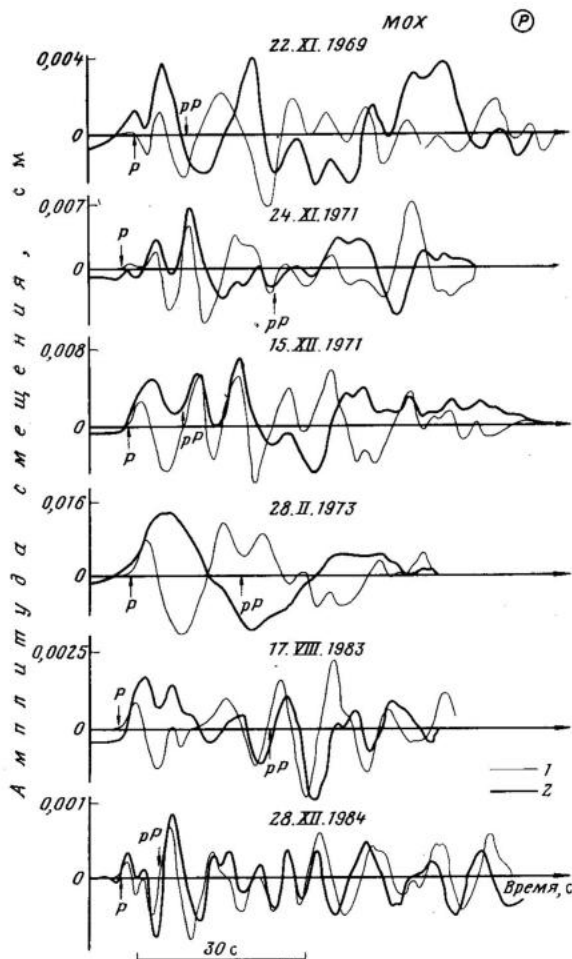


Рис. 2. Копии сейсмограмм сильных камчатских землетрясений (фаза P). 1 — записи их на станции $МОХ$ ГДР (канал Z); 2 — результаты их деконволюции

нашло отражение в форме записей группы P -волн этих землетрясений. На рис. 2 показаны копии сейсмограмм ст. Мокс ($МОХ$, ГДР) всех шести землетрясений, записанных длиннопериодным вертикальным каналом $SSI-1$ с увеличением 100 [41]. Эпицентральное расстояние составляет около 75° . Трасса очаг — сейсмостанция для всех землетрясений почти одинакова. По методике [3] проведена процедура деконволюции этих записей, ее результат также приведен на рис. 2. Можно видеть, насколько сложен и различен процесс формирования групп P -волн. На интервале между P и pP вступает несколько импульсов, которые, по-видимому, соответствуют различным фазам развития процесса в очаге землетрясения.

На рис. 3 показаны спектрально-временные диаграммы группы P -волн, полученные по записям широкополосной аппаратуры ЧИСС в Обнинске для землетрясений 22.XI 1969 и 28.II 1973 гг. [6, 7]. Для землетрясения 22.XI 1969 г. (рис. 3, а) частотно-временное поле P -волн характеризуется отдельными энергетическими всплесками с нарастающей во времени интенсивностью. В первые 5 с выделяется относительно короткопериодный толчок с $m_{pv}=6,7-7,0$, затем, через 15 с от вступления P , выделяется второй толчок с $m_{pv}=7,35$. Максимум его спектра перемещается в область более длинных периодов. Через 30 с

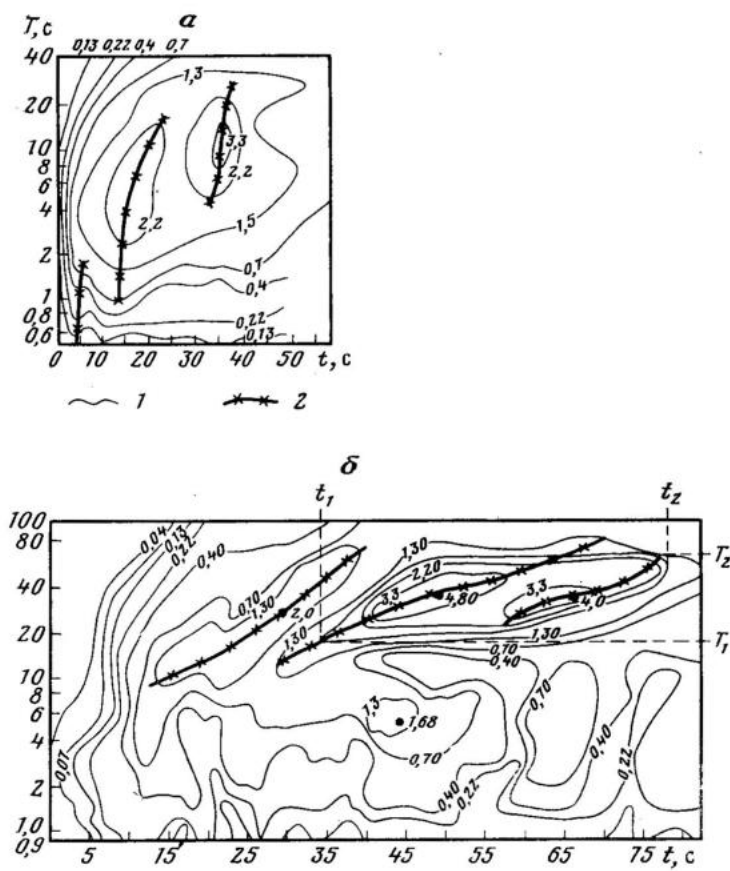


Рис. 3. Спектрально-временные диаграммы P -волн землетрясений 22.XI 1969 г. (а) и 28.II 1973 г. (б) по записям аппаратуры ЧИСС (канал Z) (Обнинск) [6, 7]. 1 — изолинии рельефа A/T , мк/с ; 2 — гребни рельефа; t_1 , t_2 , T_1 , T_2 — параметры условной площади активной полосы спектра

после начала записи отмечается еще более длиннопериодный всплеск ($m_{pv}=7.4$), не сопровождающийся увеличением интенсивности на коротких периодах, после которого наступает общее ослабление интенсивности. В группе P -волн землетрясения 28.II 1973 г. (рис. 3, б) на первых секундах записи идет медленное нарастание интенсивности. Значения колебательной скорости медленно возрастают во времени, постепенно смещаясь в сторону длинных периодов. Длительность формирования импульса аномально велика — 48 с. Это хорошо видно и по результату деконволюции (см. рис. 2). Первый слабый энергетический всплеск начинается на 13 с от начала записи землетрясения и продолжается 26 с. На 34 с от начала записи начинается основной толчок, который длится 46 с. Основная часть энергии землетрясения выделилась между 34 и 80 с на аномально больших периодах $T=15-56$ с. Максимальная магнитуда $m_{pv}=7.6$ отмечается на периоде 32 с.

Таким образом, можно видеть, что формирование магистральных разрывов в очагах сильных камчатских землетрясений представляет собой дискретный процесс. Аналогичные результаты получаются и при анализе стоппинг-фаз землетрясений 24.XI 1971 и 28.II 1973 гг. [2, 9, 10]. Выделены три очаговых фазы для землетрясения 24.XI 1971 г. [2, 10] и две фазы — для землетрясения 28.II 1973 г. [9]. Протяженность субочагов, излучающих эти фазы, оценивается в пределах 20–30 км, скорости распространения разрыва — 1,5–4,4 км/с. Максимальная доля

выделенной энергии землетрясения связана с формированием второго или третьего субочага. Первый субочаг, как следует из анализа спектрально-временной картины и стоппинг-фаз, по-видимому, обладает наименьшей мощностью.

Энергетический класс и магнитуда. Определяются энергетические классы землетрясений

$$K_{SI,2}^{\Phi_{88}} = K = 1,5M_{LH} + 4,5; \quad K = 2m_b + 2,1, \quad (1)$$

далее будем писать просто K .

Оценки энергетического класса $K_{SI,2}^{\Phi_{88}}$ [23] проведены для сильных землетрясений по записям камчатской региональной сети (табл. 1). Надо отметить, что эти оценки не очень надежны, вследствие некачественной записи больших амплитуд смещений грунта аппаратурой близких региональных станций. Снятие максимальных амплитуд часто затруднено. В результате оценки K проводятся по малому числу станций и по заглубленному каналу. Для рассматриваемых землетрясений все замеры сняты по заглубленному каналу, причем в определении класса участвовало от одной до шести станций. Оценить K для землетрясения 24.XI 1971 г. не удалось ни по одной станции.

В связи с этим для землетрясений 1971 г., а также для очага 1983 г. энергетический класс был определен дополнительно с использованием записей сильных движений. Методика [3] позволяет по записям приборов ИСО-С5С и акселерографов восстановить истинное движение грунта в полосе частот 0,5–5 Гц. Этот сигнал подавался на вход численной модели регионального сейсмографа ВЭГИК с периодом 1,2 с. В результате мы получаем модельную запись короткопериодной сейсмограммы смещения, что позволяет определять энергетический класс стандартным образом (по номограмме С. А. Федотова [23]). Результаты определений приведены в табл. 1 (K^*). При этом для толчка 1983 г. определен по записям СССР на двух станциях — Кроноки ($K^* = 16,0$) и Крутоберегово ($K^* = 16,6$), а при оценке K для очагов 1971 г. использовано по одной станции: Петропавловск (ИСО-2 — СБС) для очага 24.XI 1971 г. и Крутоберегово (УАР) для очага 15.XII 1971 г.

В связи со значительной протяженностью очага 15.XII 1971 г. (90 км) и расположением ст. Крутоберегово вблизи одного из концов очага ($S-P=6,5$ с) оценка K проведена также для излучателя в срединной части очага, считая $S-P=10,0$ с. В этом случае мы получили $K^*=15,5$.

Сопоставление оценок K и K^* , т. е. оценок энергетического класса сильных землетрясений в дальней и ближней зоне, показывает, что для корового очага 15.XII 1971 г. эти оценки близки, а для верхнемантийного очага 17.VIII 1983 г. оценки K^* на порядок выше.

Магнитудные оценки привлечены по телесеismicким данным сетей Единой системы сейсмических наблюдений Советского Союза (ЕССН) и WWSSN (США) (см. табл. 1). Оценки магнитуд по продольным волнам m_{pv} и m_b различаются для отдельных землетрясений, причем m_{pv} в пяти случаях из шести превышает m_b , в среднем на 0,8. Оценки магнитуд по поверхностным волнам M_{LH} и M_s также различаются. M_{LH} превышает M_s в среднем на 0,4, как указывалось ранее сотрудницей ИФЗ АН СССР О. В. Потаповой.

Механизм очага землетрясений переопределялся специально для данной статьи на основании анализа распределения в пространстве знаков смещений в первых вступлениях P -волн на ЭВМ ЕС-1033 по программе [21] с учетом регионального годографа [20]. Диаграммы механизма очага в проекции на верхнюю полусферу приведены на рис. 1, параметры системы напряжений в очаге землетрясений и возможных поверхностей разрыва даны в табл. 2. В этой же таблице до-

Механизм очага землетрясений (нижняя полусфера)

Дата	Ось главного напряжения						Нодальная поверхность					
	T		N		P		N _{P I}			N _{P II}		
	PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
22.XI 1969	48	272	38	62	17	164	46	70	50	295	45	151
	58	319	12	209	29	112	—	—	—	—	—	—
24.XI 1971	45	322	16	216	41	112	36	88	106	132	16	6
15.XII 1971	44	244	40	30	18	136	16	74	48	269	45	156
	55	293	6	31	34	125	—	—	—	—	—	—
28.II 1973	64	304	2	39	26	129	37	71	89	223	19	96
	65	302	5	42	25	134	—	—	—	—	—	—
17.VIII 1983	73	16	1	282	17	192	280	28	88	103	62	92
	69	37	19	239	7	147	216	41	60	73	55	114
28.XII 1984	40	229	42	10	21	120	257	45	162	359	78	47
	32	223	56	24	9	127	260	61	162	359	74	30

Примечание. В первой строке для каждого землетрясения приведены результаты определений на ЭВМ по программе [21], во второй строке — для событий 1, 3, 4 — по [39], для событий 5, 6 — по [32, 33]. Приняты следующие обозначения углов: *PL* — угол с горизонтом, град; *AZM* — азимут, град; *STK* — простираание плоскости разрыва, град; *DP* — падение плоскости разрыва, град; *SLIP* — угол скольжения плоскости разрыва, град.

полнительно приведены определения механизма очагов 22.XI 1969, 15.XII 1971 и 28.II 1973 гг. по данным анализа знаков смещений *P*-волн и поляризации *P*-волн по записям длиннопериодной сети WWSSN [39] и параметры наилучшего двойного диполя для очагов 17.VIII 1983 и 28.XII 1984 гг., определенные методом тензора момента центроида [32, 33]. Наши определения механизма очагов землетрясений проведены по наиболее полной подборке данных о знаках смещений короткопериодных *P*-волн, опубликованных в Бюллетене международного сейсмологического центра, а также по данным, снятым с сейсмограмм камчатской региональной сети станций. Программа определения механизма очага [21] при выдаче результатов счета приводит для каждого варианта значения функции максимального правдоподобия. Среди возможных вариантов были найдены близкие к приведенным в [39]. Сопоставление соответствующих значений функции максимального правдоподобия показало, что для очага 22.XI 1969 г. наш вариант характеризуется на порядок большим значением функции, для очага 15.XII 1971 г. значение функции для нашего варианта больше в 2 раза, а для очага 28.II 1973 г. величины функции максимального правдоподобия равны и параметры механизма очага почти одинаковы.

Определения механизма очагов землетрясений 17.VIII 1983 и 28.XII 1984 гг., проведенные по знакам первых смещений *P*-волн и определения методом тензора момента центроида [32, 33] оказались достаточно близкими.

Отметим общие черты механизма очагов рассматриваемых землетрясений. Очаги коровых землетрясений севера Камчатки (22.XI 1969, 15.XII 1971 и 28.XII 1984 гг.) имеют почти подобные механизмы. Это взбрососдвиги в условиях северо-восточного близгоризонтального сжатия (*P*) и более крутонаклоненного близширотного растяжения (*T*). Два южных верхнемантийных очага (глубиной 70–100 км) 24.XI 1971 и 28.II 1973 гг. характеризуются наличием одной близвертикальной возможной поверхности разрыва, ориентированной вдоль простираания структур Курило-Камчатской островной дуги, и второй пологой, различно ориентированной плоскостью разрыва. Оси напряжений *P* и *T* ориентированы вкрест простираания структур, причем ось *P* более наклонена к горизонту. Особняком находится очаг 17.VIII 1983 г. на глубине 98 км. Здесь отмечается взброс по наклонным поверхностям, обе нодаль-

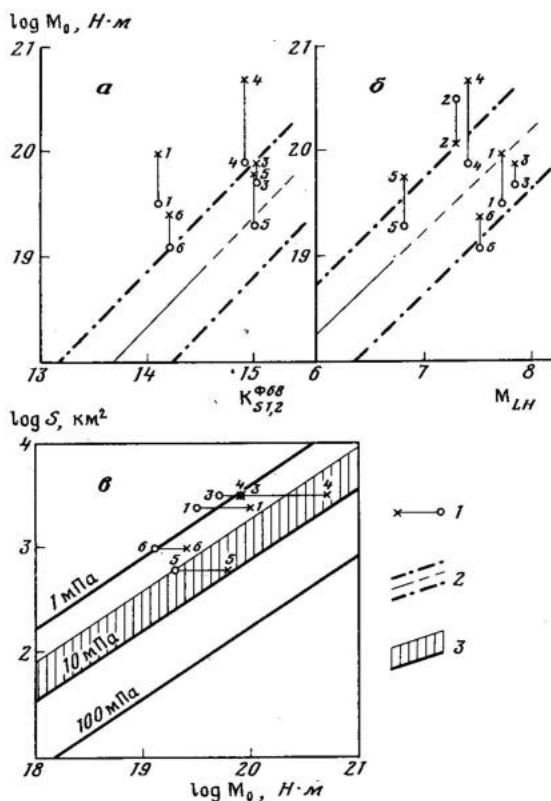


Рис. 4. Соотношение сейсмического момента M_0 с энергетическим классом (а), магнитудой (б) и площадью очаговой зоны землетрясения (в). 1 — оценки сейсмического момента по P -волнам (крестик) и R -волнам (кружок); 2 — корреляционные соотношения по [11]; 3 — область внутриплитовых очагов, по [36]

ные поверхности ориентированы вкост простирания Курило-Камчатских структур, как и близгоризонтальная ось напряжения сжатия.

Скалярный сейсмический момент M_0 определялся для рассматриваемых очагов рядом исследователей [1, 10, 12, 13, 32, 33] (табл. 3). Дополнительно проведено определение M_0 по записям длиннопериодного вертикального канала SSJ-1 на станции Мокс (МОХ) ГДР, имеющимся для всех шести землетрясений. Сейсмический момент оценивался по спектрам P -волн и поверхностных волн Рэлея по методике, описанной

Таблица 3

Оценки спектральных и очаговых параметров землетрясений по данным станции МОХ (ГДР) и оценки сейсмических моментов по литературным данным

Дата	M_{LH}	P -волны			R -волны			Оценки $\log M_0$ по литературным данным
		f_0 , Гц	r , км	S , 10^8 км ²	$\log M_0^P$ (H. м.)	$\Delta\sigma$, МПа	$\log M_0^R$ (H. м.)	
22.XI 69	7,7	0,026	90	25,4	20,0	0,06	19,5	—
24.XI 71	7,3	0,035	78	19,1	20,1	0,1	20,5	20,3[10]; 20,6; 20,4 [1]
15.XII 71	7,8	0,057	41	5,3	19,9	0,5	19,7	20,6 [1]
28.II 73	7,5	0,028	97	29,5	20,7	0,2	19,9	—
17.VIII 83	6,9	0,105	26	2,1	19,8	1,4	19,3	19,6 [32]; 19,2; 19,8 [13]
28.XII 84	7,5	0,110	18	1,0	19,4	1,7	19,1	19,2 [33]; 18,6; 19,3 [12]

в [11, 31, 34]. Результаты приведены в табл. 3. Для пяти из шести событий оценки M_0 по поверхностным волнам ниже оценок M_0 по P -волнам в среднем на 0,4 лог. ед. Это, возможно, связано с тем, что оценки M_0 по поверхностным волнам проведены лишь по 20–30-секундным волнам, так как амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) аппаратуры не позволила иметь надежные оценки по более длинным периодам. На рис. 4 показана зависимость оценок сейсмического момента от K , M . Там же приведены региональные корреляционные зависимости этих величин, полученные в [11] для магнитудного интервала $M=4-6,5$, глубин очага 0–100 км и продолженные для больших магнитуд. Эта экстраполяция, по-видимому, вполне оправдана для соотношения M_0 и M . Можно видеть при этом группирование данных для очагов с нормальной и промежуточной глубинами очагов. Последние имеют относительно низкие значения магнитуд, а первые — более высокие значения магнитуд по сравнению с уровнем корреляционной прямой, причем для очагов с промежуточной глубиной отклонения значительнее.

При анализе соотношения $K=f(M_0)$ (рис. 4, а) можно видеть, что оценки K для событий 22.XI 1969, 28.II 1973 и 28.XII 1984 гг., по-видимому, занижены.

Макросейсмические проявления и оценки сильных движений при землетрясениях

Рассматриваемые землетрясения ощущались на восточном побережье Камчатки силой до 6–7 баллов. Схемы изосейст этих землетрясений приведены в работах [4, 5, 12, 13, 17, 27]. Характерной чертой изосейст является их вытянутость вдоль простиранья структур Курило-Камчатской островной дуги, что хорошо видно на карте изосейст землетрясения 24.XI.1971 (рис. 5, а). Сводные графики спадания балльности с расстоянием приведены на рис. 5, б, в. Здесь же показаны расчетные графики спадания балльности, построенные на основе формулы (2), предложенной в [25]:

$$I = 1,5 M - 2,63 \lg r - 0,0087 r + 2,5, \quad (2)$$

где I — интенсивность землетрясения на гипоцентральной расстоянии r при магнитуде M .

На рис. 5 данные сгруппированы для очагов в земной коре на глубинах 20–40 км (рис. 5, б) и для очагов в верхней мантии на глубинах 70–100 км (рис. 5, а). На рисунке видно, что для трех коровых очагов Северной Камчатки с магнитудами $M=7,5-7,8$ макросейсмический эффект оказался ниже расчетного. Оценки макросейсмических магнитуд $M_{\text{макр}}$, полученных по формуле (2) на эпицентральных расстояниях 50–100 км, приведены в табл. 1. Значения макросейсмических оценок магнитуд по формуле (2) получаются ниже инструментальных, причем для коровых очагов севера Камчатки в среднем на 1,3 (см. табл. 1). Подобный эффект был отмечен ранее в [5, 12].

Для четырех очагов из шести характеристики сильных движений (скорости, ускорения) представлены в табл. 4. Записи сильных движений были получены на расстояниях от 10 до 110 км в 6–8-балльных зонах сотрясений [12, 13, 29]. Максимальное значение ускорения зарегистрировано на мысе Африка при землетрясении 28.XII 1984 г. и равно 0,3 g . В табл. 4 проведено сопоставление макросейсмических и инструментальных оценок балльности. Они совпадают для очагов 24.XI и 15.XII 1971 г., но для очагов 17.VIII 1983 г. и 28.XII 1984 г., согласно табл. 2.1 в работе [18] и табл. 4, инструментальные оценки интенсивности на 1,5–3,0 балла выше макросейсмических и для землетрясения 17.VIII.1983 г. на 2 балла превышают расчетную. Соотношение (2) [25] должно уточняться по мере накопления новых данных.

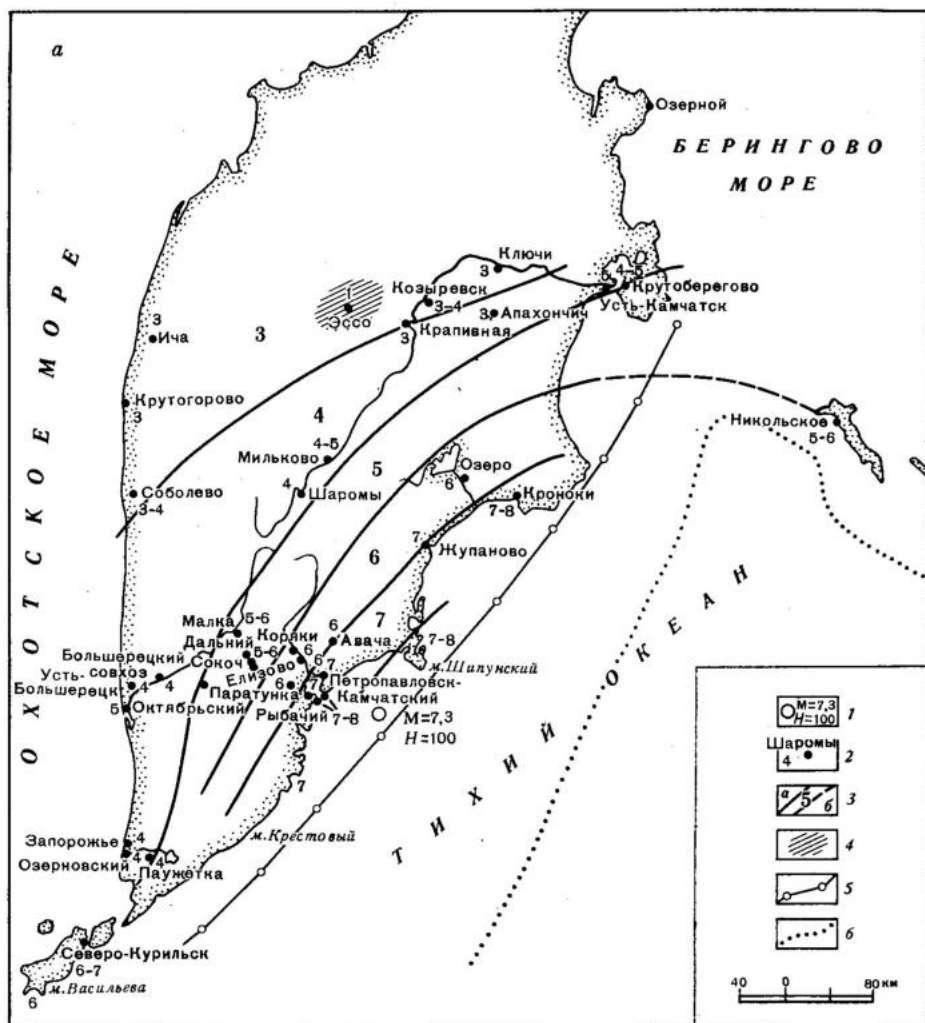


Рис. 5, а

На рис. 6 показаны спектры Фурье ускорения колебаний грунта при сильных землетрясениях. Здесь же приведен стандартный калифорнийский спектр для землетрясения с $M=6,6-7$ [37]. Спектры сгруппированы в зависимости от глубины очага: на нижней части рисунка — коровые очаги (1 — 15.XII.1971 г., 2 — 28.XII.1984 г.) на верхней — верхнемантийные (4 — 24.XI 1971 г., 5 — 17.VIII 1983 г.). Для удобства сопоставления их формы спектры приведены в каждой группе к некоторому условному уровню и не имеют абсолютной привязки по вертикальной шкале. Можно видеть, что спектры коровых и верхнемантийных очагов различаются по форме. Коровые очаги более низкочастотные, максимальный уровень спектра отмечается в интервале 0,2–2,0 Гц. Верхнемантийные очаги имеют максимальный уровень спектра в интервале от 1,0 — до 10–20 Гц. Калифорнийский спектр, имеющий максимум до частоты 6–8 Гц, занимает промежуточное положение.

Развитие очагов сильных землетрясений в ходе афтершокового процесса

На рис. 7 и 8 показаны эпицентры (а для верхнемантийных очагов и гипоцентры) афтершоков сильных землетрясений раздельно для активности первых суток и первого года. На схемах первых суток актив-

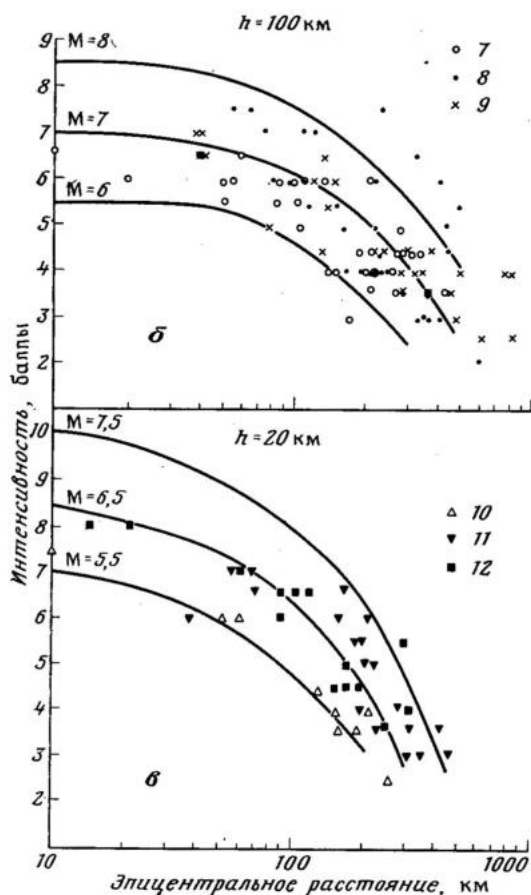


Рис. 5. Изосейсты землетрясения 24.XI 1971 г. (а) и графики спадаения балльности с расстоянием для землетрясений с промежуточной глубиной очага (б) и нормальной (в). Изосейсты землетрясения 24.XI 1971 г.: 1 — эпицентр землетрясения; 2 — наименования населенных пунктов с указанием интенсивности сотрясений в баллах; 3 — изосейсты: а — уверенные, б — предполагаемые; 4 — вероятная область аномально высокого поглощения энергии сейсмических волн; 5 — выход оси фокальной зоны на поверхность (линия $A_{10} = \text{макс}$); 6 — оси глубоководных желобов. Графики спадаения балльности, даты событий: 7 — 17.VIII.1983 г., $M=6,9$; 8 — 24.XI 1971 г.; $M=7,3$; 9 — 28.II 1973 г., $M=7,5$; 10 — 28.XII 1984 г., $M=7,5$; 11 — 15.XII 1971 г., $M=7,8$; 12 — 22.XI 1969 г., $M=7,7$

ности приведены очаги энергетического класса $K \geq 8,5$, на схемах первого года активности — очаги энергетического класса $K \geq 11,0$. На рис. 7, а и 8, а показаны границы областей, из которых проводилась выборка каталога; на основе каталога построены карты эпицентров афтершоков. Эти области различаются по своим размерам в зависимости от масштаба проявлений афтершоковой активности, но во всех случаях существенно превышают области возникновения афтершоков. Поэтому границы рисунков, на которых изображены схемы эпицентров, отличаются от границ областей выборок и включают в себя лишь пространство, реально занятое очагами землетрясений. Во всем остальном пространстве областей выборок за рассматриваемое время очагов землетрясений не отмечено. Афтершоки первых суток, как полагают многие исследователи, достаточно хорошо обрисовывают область очага сильного события. Афтершоки первого года показывают основные тенденции дальнейшего развития очаговой области.

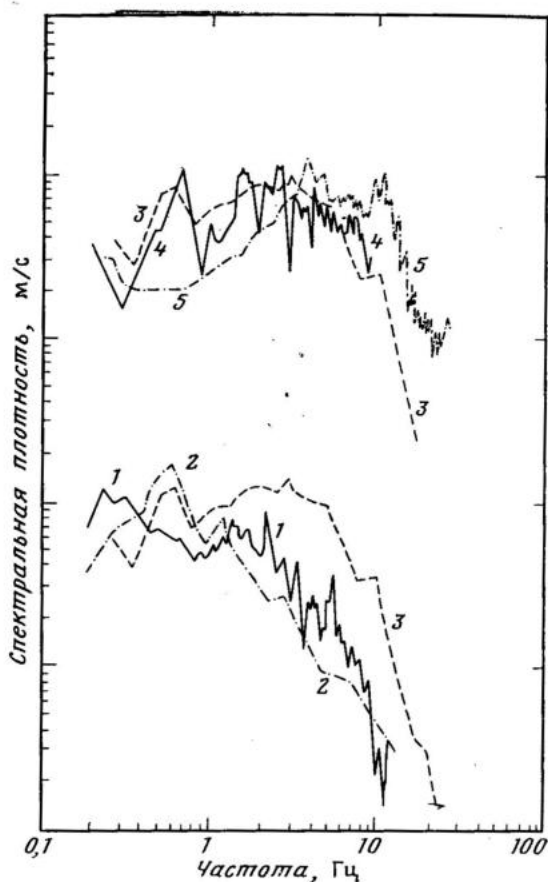


Рис. 6. Спектры Фурье ускорений колебаний грунта. 1 — 15.XII 1971; 2 — 28.XII 1984; 3 — средний калифорнийский спектр [37]; 4 — 24.XI 1971 г.; 5 — 17.VIII 1983 г.

На основе очертаний области афтершоков первых суток активности: проведены оценки размеров очаговых областей (длины, ширины, площади) и очаговых параметров землетрясений (табл. 5). При расчете очаговых параметров привлекались оценки сейсмического момента M_0 по поверхностным волнам Рэлея (см. табл. 3). Были рассчитаны величины сброшенных направлений $\Delta\sigma$ и подвижки $\bar{u}$ в очагах землетрясе-

Таблица 4

Параметры сильных движений

Дата	Время в очаге, час. мин	Эпикентральное рас- стояние, км	Глубина очага, км	M_LH	Пункт регист- рации	Тип прибора	Канал	Период, с	Колеба- тельная скорость, ускорение		Интенсив- ность, балл	
									м/с	g	макро- сейсмы	инстру- мент
24.XI 71	19 35	70	100	7,3	Петро- павловск	C5C+ +ИСО-2	С-Ю	1,2	0,065	—	7	7
15.XII 71	08 29	70	25	7,8	Крутобе- регово	УАР	С-Ю	0,52	—	0,085	7	7
17.VIII 83	10 55	110	98	6,9	Кроноки	ССРЗ-М	В-3	0,11	—	0,25	6	9
28.XII 84	10 37	10	19	7,5	Африка	ССРЗ-М	В-3	1,3	—	0,3	7—8	9

ний по формулам [30]:

$$\Delta\sigma = \frac{16}{3\pi} \sqrt{\frac{L}{W}} \frac{M_0}{S^{3/2}}, \quad (3)$$

$$\bar{u} = \frac{M_0}{\mu S}, \quad (4)$$

где L , W , S — соответственно длина, ширина и площадь очаговой зоны; μ — модуль сдвига. Значения модуля сдвига взяты в соответствии с [11]. Для очага землетрясения 24.XI 1971 г. оценки не производились ввиду малого количества афтершоков. По данным табл. 5, протяженность разрыва в очагах землетрясений варьирует от 45 до 100 км, ширина очаговой зоны — от 15 до 55 км. Величины подвижек находятся в интервале от 35 до 136 см. Сброшенные напряжения варьируют от 0,7 до 6,3 МПа, причем в четырех случаях от 0,7 до 1,7 МПа. Относительно велика оценка сброшенного напряжения для землетрясения 17.VIII 1983 г. с глубиной очага 98 км (6,3 МПа). Как видно на рис. 4, в, где площадь очаговой зоны показана в зависимости от M_0 , значения для землетрясения 17.VIII 1983 г. попадают в интервал внутриплитовых землетрясений [36] с высокими значениями сброшенных напряжений, в то время как остальные очаги характеризуются как межплитовые. Все рассмотренные очаги можно считать резкими по классификации Н. В. Шебалина [28], учитывающей соотношение магнитуды M_{LH} и площади очаговой зоны.

Увеличение области афтершоков в течение первого года активности по сравнению с первыми сутками активности невелико и, по-видимому, определяется степенью активизации близлежащих тектонических разломов. Построения для афтершоков первого года проведены для землетрясений энергетического класса $K \geq 11$ или $M \geq 4,25$. Поэтому для удобства сравнения очаги афтершоков первых суток активности с $K \geq 11$ на рисунках помечены крестиками.

Примечательно, что гипоцентры главных толчков располагаются у верхнемантийных землетрясений в самой нижней точке их очаговых зон, первые афтершоки отмечаются близ верхней оконечности очаговых зон (см. рис. 8). Последующие афтершоки очерчивают область магистрального разрыва. Более сильные афтершоки группируются в разрезе вблизи нижней плоскости очаговой зоны. В горизонтальной проекции можно наблюдать группирование наиболее сильных афтершоков у одного (17.VIII 1983 г.) или двух концов (28.II 1973 г.) очаговой зоны.

У коровых очагов (см. рис. 7) эпицентры главных событий располагаются либо в крайней точке очаговой зоны (22.XI 1969 г.), либо в центральной части зоны (15.XII 1971, 28.XII 1984 гг.). Развитие афтершоков первых суток активности шло импульсивно, постепенно заполняя в разных направлениях очаговую зону. Сильные афтершоки расположе-

Таблица 5

Оценка очаговых параметров землетрясений по наблюдениям афтершоков первых суток активности

Дата	M_{LH}	L , км	W , км	S , км ² · 10 ³	L/W	Сброшенное напряжение, МПа	Подвижка, см	$Q = M_{LH} - \log S$
22.XI 1969	7,7	100	30	2,4	3,3	1,2	62	4,3
24.XI 1971	7,3	—	—	—	—	—	—	—
15.XII 1971	7,8	90	50	3,5	1,8	1,7	136	4,3
28.II 1973	7,5	80	55	3,5	1,5	1,0	48	4,0
17.VIII 1983	6,9	45	15	0,6	3,0	6,3	86	4,0
28.XII 1984	7,5	45	30	1,1	2,5	0,7	35	4,5

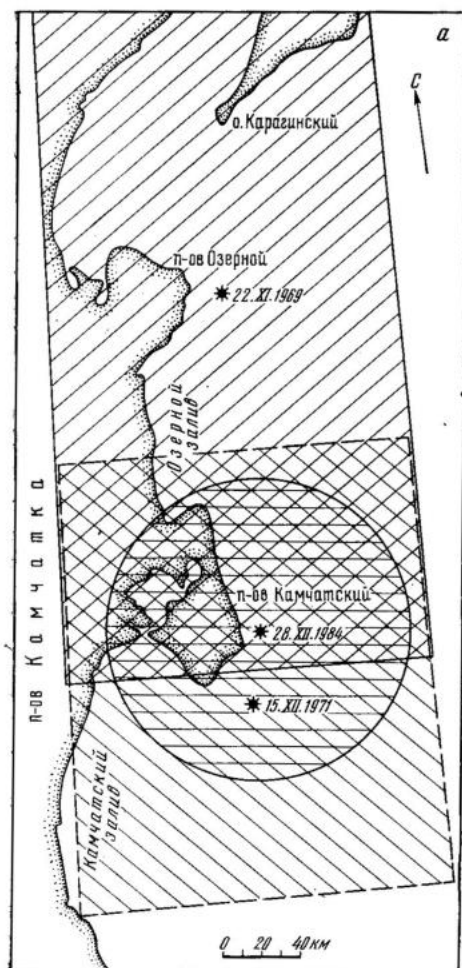


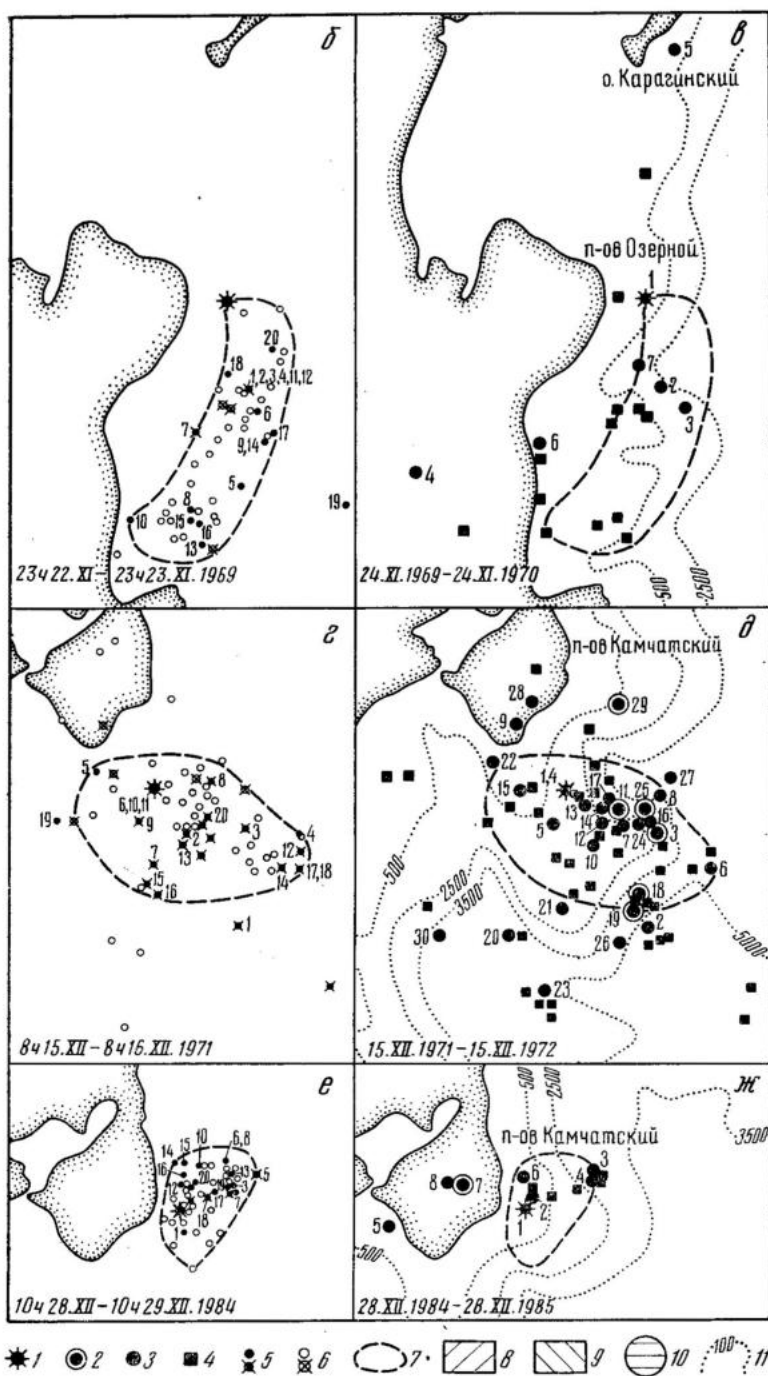
Рис. 7. Развитие афтершокового процесса при сильных камчатских землетрясениях с нормальной глубиной очага, $h=10-40$ км. а — карта эпицентров рассматриваемых землетрясений и границы областей, в которых проводился отбор афтершоков; б, г, е — схемы эпицентров афтершоков первых суток активности с $K \geq 8,5$, $M \geq 2,5$; в, д, жс — схемы афтершоков первого года активности с $K \geq 11,0$, $M \geq 4,25$. 1 — эпицентр главного толчка; 2—6 — эпицентры афтершоков: 2 — с $K > 12,5$; 3 — с $11,5 < K \leq 12,5$; 4 — с $11,0 \leq K \leq 11,5$; 5 — первые 20 афтершоков первых суток активности; 6 — прочие афтершоки первых суток активности (для 5 и 6 косыми крестиками помечены очаги энергетического класса $K \geq 11,0$); 7 — очертания области афтершоков первых суток активности; 8—10 — области, из которых проводились выборки афтершоков в слое 0—150 км для землетрясений 22.XI 1969 г., $h=25$ км, (8); 15.XII 1971 г., $h=25$ км (9); 28.XII 1984 г., $h=19$ км (10); 11 — изобата, м. Номера соответствуют последовательности возникновения афтершоков с $K \geq 8,5$ в первые сутки активности (схемы б, г, е) и афтершоков с $K \geq 11,5$ в первый год активности (схемы в, д, жс)

ны либо по двум концам очаговой зоны (28.XII 1984 г.), либо отдельными скоплениями внутри и по окраине очаговой зоны (22.XI 1969, 15.XII 1971 гг.). Время интенсивной афтершоковой активности очагов рассматриваемого энергетического интервала ($M=6,9-7,8$) достаточно мало. На рис. 9 представлен обобщенный график спадания числа афтершоков во времени в течение 300 сут. Афтершоки энергетического класса $K \geq 8,5$ ($M \geq 2,5$) выбраны из областей радиусом 75 км от эпицентра главного толчка. Для удобства сопоставления графики отдельных серий афтершоков смещены по вертикальной шкале таким образом, чтобы точки числа афтершоков вторых суток активности совместились на уровне точки вторых суток активности Усть-Камчатского землетрясения 15.XII 1971 г. (в первые сутки неизбежны пропуски в каталоге в виду большой загруженности сейсмограмм). Можно видеть, что наиболее активная жизнь очага со скоростью спадания числа афтершоков пропорционально $1/t$ продолжается 20—30 сут. Время полного затухания афтершоковой активности определить достаточно сложно. Для очагов с $M \geq 7 \frac{3}{4}$ оно может длиться 10—15 лет [22, 26].

Обсуждение результатов

Отметим некоторые характерные черты развития очагов сильных камчатских землетрясений 1962—1986 гг.

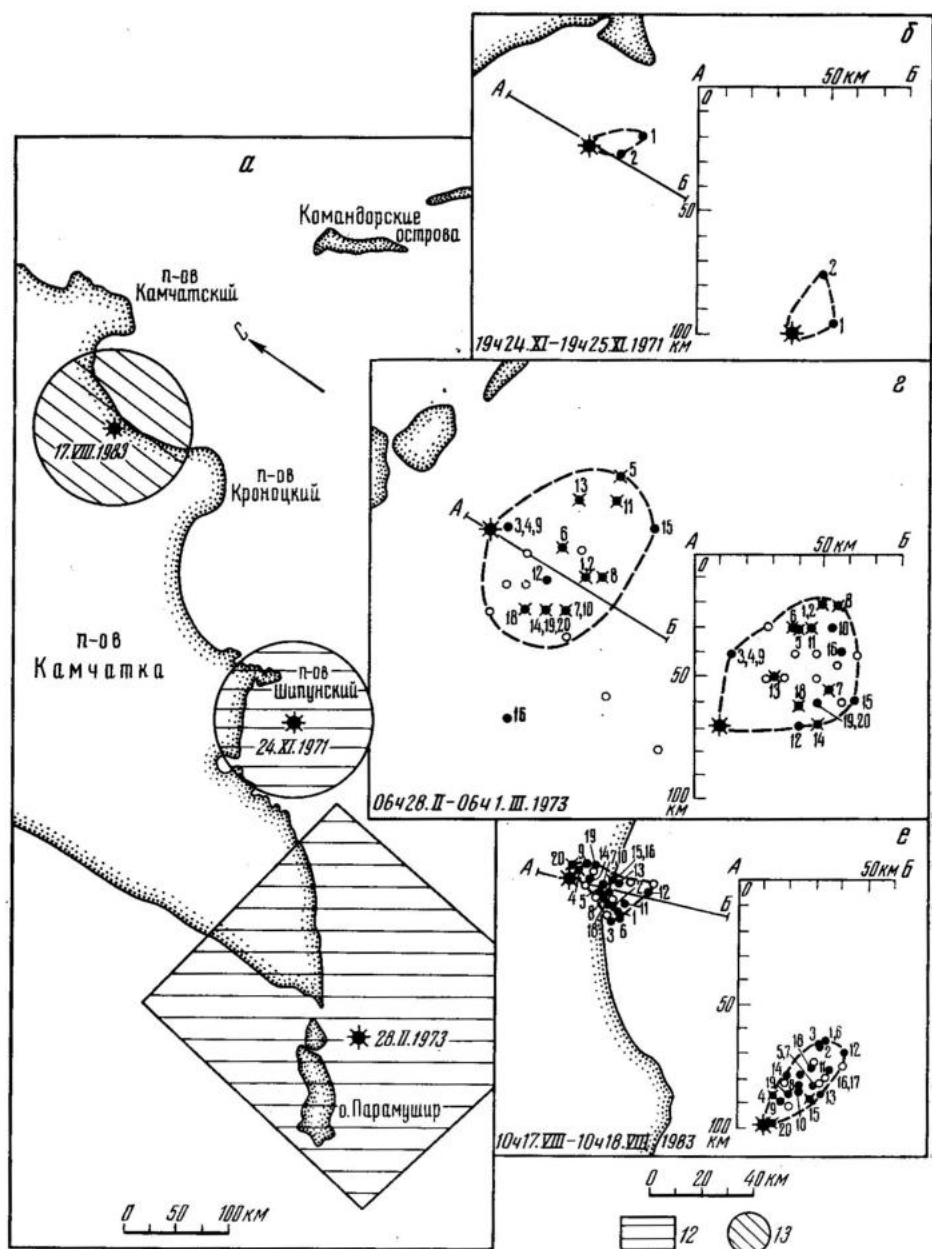
Их очаги представляли собой набор субочагов, причем максимальная энергия большей частью выделялась не первым субочагом.



Время наиболее интенсивной афтершоковой активности очагов землетрясений с $M=6,9-7,8$ не превышало 20–30 сут.

Увеличение площади, занятой афтершоками сильных землетрясений первого года активности, невелико, по сравнению с площадью афтершоков первых суток активности.

Рассмотрим эти положения. На сложный характер (наличие многократных разрывов, субочагов) камчатских сильных землетрясений указывают многие авторы [2, 9, 10 и др.]. Были выделены очаговые фазы для Петропавловского землетрясения 24.XI 1971 г. [2, 10], Усть-Кам-



чатского 15.XII 1971 г. [4], Северо-Курильского 28.II 1973 г. [9], Камчатского землетрясения 17.VIII 1983 г. [13]. С. Х. Харцелл и Т. Х. Хитон [35] рассмотрели временные функции очага для 63 сильных поверхностных землетрясений зон поддвига плит. Для региона Камчатки в качестве характерной особенности очагов отмечается их многократность с регулярным интервалом, которую авторы объясняют либо воздействием воды, либо регулярным интервалом между неоднородностями в очаге.

Ф. Таджима и Х. Канамори [40], рассматривая проблему развития афтершоковой зоны сильных землетрясений в зонах субдукций, выделяют два основных типа: «чилийский», при котором наблюдается слабое увеличение афтершоковой зоны в течение года активности по сравнению с областью первых суток активности, и «марианский», при кото-

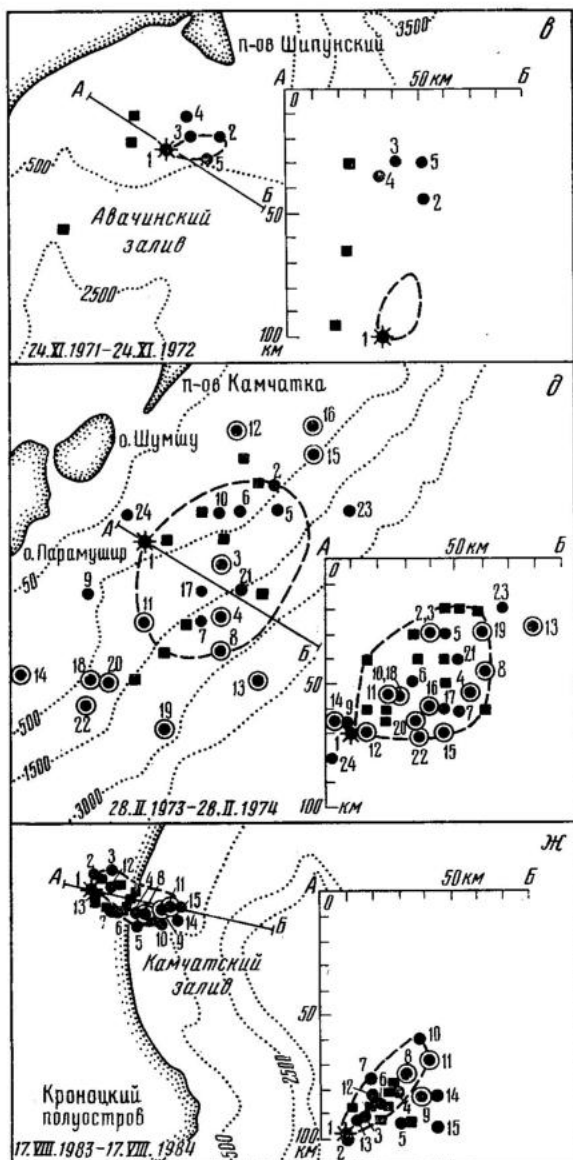


Рис. 8. Развитие афтершокового процесса при сильных камчатских землетрясениях с промежуточной глубиной очага, $h=70-100$ км. а — карта эпицентров рассматриваемых землетрясений и границы областей, в которых проводился отбор афтершоков; б, г, е — карты и вертикальные разрезы гипоцентров афтершоков первых суток активности с $K \geq 8,5$, $M \geq 2,5$; в, д, ж — то же для афтершоков первого года активности с $K \geq 11,0$, $M \geq 4,25$. 1 — эпицентр главного толчка; 2–6 — эпицентры и гипоцентры афтершоков: 2 — с $K \geq 12,5$; 3 — с $11,5 \leq K < 12,5$; 4 — с $11,0 \leq K \leq 11,5$; 5 — первые 20 афтершоков первых суток активности; 6 — прочие афтершоки первых суток активности (для 5 и 6 крестиками помечены очаги энергетического класса $K \geq 11,0$); 7 — очертания области афтершоков первых суток активности; 8–10 — области, из которых проводились выборки афтершоков в слое 0–150 км для землетрясений 28.II.1973 г., $h=70$ км (8), 17.VIII.1983 г., $h=98$ км (9); 24.XI.1971 г., $h=100$ км (10); 11 — изобата, м. Номера соответствуют последовательности возникновения афтершоков с $K \geq 8,5$ в первые сутки активности (схемы б, г, е) и афтершоков с $K \geq 11,5$ в первый год активности (схемы в, д, ж)

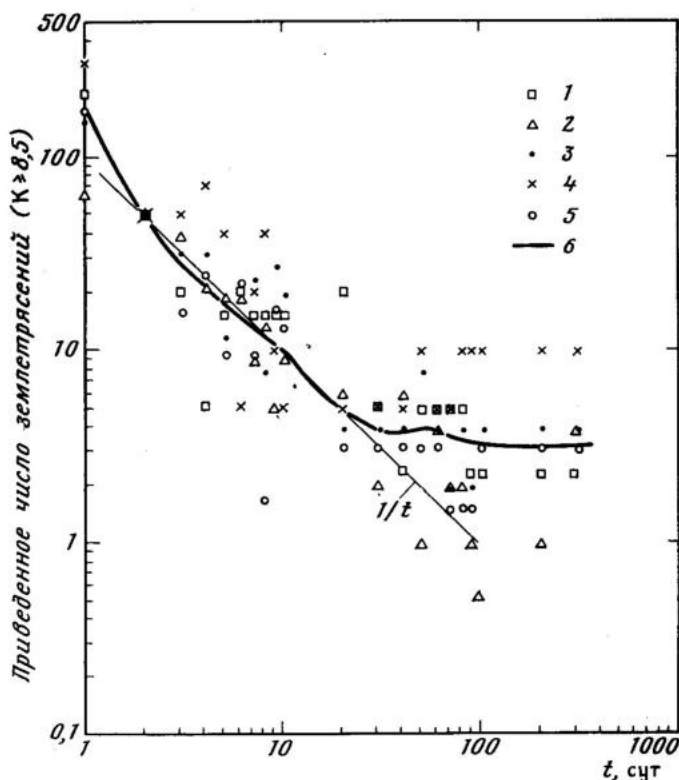


Рис. 9. Схема спадания суточного числа афтершоков для землетрясений. 1 — 22.XI 1969 г. $M=7,7$; 2 — 15.XII 1971 г., $M=7,8$; 3 — 28.II 1973 г., $M=7,5$; 4 — 17.VIII 1983 г., $M=6,9$; 5 — 28.XII 1984 г., $M=7,5$; 6 — кривая, осредненная по среднегеометрическим оценкам приведенных величин количества землетрясений/сут

ром расширение афтершоковой зоны достаточно велико. При интерпретации этих явлений авторы полагают, что область очага сильного землетрясения представляет собой набор областей повышенной прочности, окруженных ослабленными зонами. При наличии крупной прочностной зоны в пределах очага увеличение афтершоковой зоны невелико, при наличии большого количества прочностных зон небольших размеров афтершоковый процесс захватывает соответствующее большое пространство ослабленных зон. Малое увеличение афтершоковых зон рассмотренных сильных камчатских землетрясений в течение года позволяет отнести их к «чилийской» группе очагов с наличием крупной прочностной зоны, окруженной зоной тектонической раздробленности.

Расположение очагов сильных афтершоков может свидетельствовать о характере распространения магистрального разрыва в очаге главного землетрясения. Так, Т. Миятаке [38] указывает, что в случае двустороннего разрыва наблюдаются скопления афтершоков на двух концах трещины, в случае же одностороннего разрыва — на одном из концов трещины в очаге землетрясения. При этом отмечается, что в конечной точке разрыва интенсивность афтершоков выше, чем в начальной точке, что следует из динамической модели трещины.

В соответствии с этим положением можно отнести к односторонним разрывам очаг землетрясения 17.VIII 1983 г., к двусторонним — очаги землетрясений 28.II 1973, 28.XII 1984 гг. Остальные очаги имеют существенно более сложный характер и, по-видимому, процесс формирования магистрального разрыва для них определяется распределением в пространстве прочностных неоднородностей.

Сопоставление оценок площади очаговых зон сильных землетрясений по спектрам P -волн (см. табл. 3) и очертаниям области афтершоков первых суток активности (см. табл. 5) показывает существенное завышение площади по спектрам P -волн. По-видимому, это связано с вытянутостью очагов сильных землетрясений. Аналогично наблюдается и существенное несовпадение оценок сброшенных напряжений (см. табл. 3, 5), проведенных этими двумя способами. Вероятно, оценки очаговых параметров сильных землетрясений целесообразно вести на основе измерений размеров очаговой зоны как области афтершоков первых суток активности.

Спектры ускорений коровых очагов севера Камчатки и верхнемантийных землетрясений существенно различаются. Предложенный региональный спектр А. А. Гусева [18], по-видимому, в достаточной степени описывает эффект коровых очагов, однако недостаточно учитывает высокочастотный эффект верхнемантийных очагов. Следует продолжить исследования в этом направлении.

В заключение рассмотрим геодинамическую позицию очагов наших землетрясений. По типу подвижек и пространственному положению очаги разделяются на три группы: три очага в пределах земной коры Камчатского пролива и континентального склона западной части Берингова моря (22.XI 1969, 15.XII 1971, 28.XII 1984 гг.), один очаг на глубине 98 км в центре излучины побережья Камчатского залива 17.VIII 1983 г. и два очага 24.XI 1971 и 28.II 1973 гг. на глубинах 70–100 км, расположенные в южной части Камчатского участка Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны.

Два последних очага характеризуются наличием одной пологой и одной близвертикальной плоскости разрыва, причем близвертикальная плоскость ориентирована по простиранию структур Курило-Камчатской островной дуги. Этот механизм характерен для сейсмофокальных зон на промежуточных глубинах. К сожалению, существует определенная неоднозначность в идентификации реальной плоскости разрыва в очагах землетрясений. Очертания очаговой зоны, восстановленной по афтершокам первых суток активности для очага 28.II 1973 г., а также анализ очаговых фаз землетрясений 24.XI 1971 г. [10] свидетельствуют в пользу выбора близвертикальной поверхности разрыва. В то же время нельзя отрицать согласованности слип-векторов пологих плоскостей разрыва с направлением субдукции океанической плиты под континентальную, что указывает на определенную реальность пологих плоскостей разрыва.

Очаг 17.VIII 1983 г. представляет собой несколько необычное событие: этот очаг развивался поперек структур сейсмофокальной зоны, площадь очаговой зоны достаточно мала для землетрясения с подобным сейсмическим моментом (рис. 4, в). Следуя классификации Х. Канамори и Д. Андерсона [36], этот очаг следует отнести к внутриплитовым. Не исключено, что движения в нем связаны не с общими деформациями, порождаемыми существованием сейсмофокальной зоны или подвигом океанической плиты, а с процессом разрушения континентальной плиты.

Три коровых очага на севере региона расположены в области сочленения структур Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг и Командорской котловины. Как уже отмечалось выше, все три очага имеют подобный механизм. При этом в качестве реальных плоскостей разрыва во всех трех случаях можно выбрать подвижки с левосторонним сдвигом, осложненным взбросовой компонентой, ориентированные в согласии с простиранием очаговых зон (см. рис. 1) и вдоль простирания изобат континентального склона Командорской котловины Берингова моря. По-видимому, движения в очагах этих землетрясений связаны с тектонической активностью окраины Командорской котлови-

ны при взаимодействии со структурами Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

Авторы выражают признательность руководству Института физики Земли Академии наук ГДР, ОМЭ ИФЗ АН СССР за предоставленные микрофильмы сейсмограмм сильных Камчатских землетрясений. Авторы признательны А. А. Гусеву за полезное обсуждение отдельных положений работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аптекман Ж. Я., Захарова А. И., Зобин В. М., Левшин А. Л., Малиновская Л. Н., Матвиенко Ю. Д., Старовойт О. Е., Чепкунас Л. С., Штейнберг В. В. Очаги сильных камчатских землетрясений 1971 г.//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 1. С. 37—56.
2. Горбунова И. В. Определение протяженности очага землетрясения и ориентации разрыва по волновой картине на сейсмограмме//Докл. АН СССР. 1981. Т. 261. № 4. С. 836—839.
3. Гусев А. А., Гусева Е. М. Восстановление импульсов объемных волн по сейсмограммам в интерактивном режиме//Вулканология и сейсмология. 1986. № 5. С. 54—63.
4. Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Шумилина Л. С. Петропавловское землетрясение 24 (25) XI//Землетрясения в СССР в 1971 г. М.: Наука, 1975. С. 163—171.
5. Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Шумилина Л. С. Усть-Камчатское землетрясение 15.XII//Землетрясения в СССР в 1971 г. М.: Наука, 1975. С. 172—184.
6. Жбрыкунова Н. А., Жбрыкунов В. Я. Спектральные и временные характеристики Р-волн сильных землетрясений в 1973 г. (по данным ЧИСС в ЦСО Обнинска)//Землетрясения в СССР в 1973 г. М.: Наука, 1976. С. 237—242.
7. Запольский К. К., Жбрыкунова Н. А., Жбрыкунов В. Я., Логинова Г. М. Спектральный состав Р-волн сильных землетрясений//Землетрясения в СССР в 1969 г. М.: Наука, 1973. С. 220—227.
8. Зобин В. М. Механизм очага трех сильных камчатских землетрясений 1969—1973 гг. и их афтершоков//Вулканология и сейсмология. 1979. № 5. С. 74—88.
9. Зобин В. М. Фаза выхода разрыва на поверхность и процесс в очаге Северо-Курильского землетрясения 28.II.1973 г.//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1980. № 1. С. 43—51.
10. Зобин В. М. Процесс в очаге Петропавловского землетрясения (24 ноября 1971 г.)//Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 91—103.
11. Зобин В. М., Иванова Е. И., Чиркова В. Н. Очаговые параметры землетрясений Камчатки и Командорских островов//Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 83—103.
12. Зобин В. М., Гордеев Е. И., Иванова Е. И., Митякин В. П. Камчатское землетрясение 28 декабря 1984 г.//Землетрясения в СССР в 1984 г. М.: Наука, 1987. С. 134—144.
13. Зобин В. М., Гордеев Е. И., Козырева Н. П., Митякин В. П., Чиркова В. Н. Камчатское землетрясение 17 августа//Землетрясения в СССР в 1983 г. М.: Наука, 1986. С. 102—116.
14. Москвина А. Г., Корчагина О. А., Косарев Г. Л. Изучение Р-волны Усть-Камчатского землетрясения 15 декабря 1971 г.//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 4. С. 20—34.
15. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.//Отв. ред. Кондорская Н. В. Шебалин Н. В. М.: Наука, 1977. С. 535.
16. О развитии исследований по прогнозу землетрясений, цунами и вулканических извержений на Дальнем Востоке//Вестн. АН СССР. № 2. 1984. С. 3—9.
17. Оскорбин Л. С., Зобин В. М., Поплавская Л. Н., Рудик М. И., Шетников Н. А., Бойчук А. Н., Леонов Н. Н., Симбирева И. Г., Хантаева Т. Н., Шумилина Л. С. Землетрясение и цунами 28 февраля 1973 года//Землетрясения в СССР в 1973 году. М.: Наука, 1976. С. 200—210.
18. Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1980. 307 с.
19. Сейсмологический бюллетень Ин-та физики Земли АН СССР за 1983, 1984 гг. Обнинск, 1983—1985 гг.
20. Симбирева И. Г., Чепкунас Л. С. Механизмы очагов землетрясений, определенные с учетом регионального строения земной коры и мантии Камчатки//Вулканология и сейсмология. 1986. № 2. С. 85—96.
21. Старовойт О. Е., Чепкунас Л. С., Аптекман Ж. Я., Бармин М. П. Об определении механизма очагов землетрясений на ЭВМ ЕС-1030//Физика сейсмических волн и внутреннее строение Земли. М.: Наука, 1983. С. 86—97.
22. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе//Сейсмическое районирование СССР, М.: Наука, 1968. С. 121—150.

23. Федотов С. А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
24. Федотов С. А. Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для тихоокеанской сейсмофокальной зоны у берегов Курило-Камчатской дуги на 1965—1970 гг. и уточненный прогноз на 1971—1975 гг./Сейсмичность, сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 101—108.
25. Федотов С. А., Шумилина Л. С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1971. № 9. С. 3—15.
26. Федотов С. А., Чернышев С. Д., Чернышева Г. В., Викулин А. В. Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги//Вулканология и сейсмология. 1980. № 6. С. 52—67.
27. Федотов С. А., Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Чепкунас К. Е. Озерновское землетрясение и цунами 22 ноября 1969 года//Землетрясения в СССР в 1969 г. М.: Наука, 1973. С. 195—208.
28. Шебакин Н. В. Очаги сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1974. 52 с.
29. Штейнберг В. В., Фрейд В. М., Феофилактов В. Д. Колебания грунта при сильных землетрясениях на Камчатке в 1971 г./Сильные камчатские землетрясения 1971 года. Владивосток. 1975. С. 7—14.
30. Aki K. Earthquake mechanism//Tectonophysics. 1972. V. 13. № 1—4. P. 423—446.
31. Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves earthquakes//J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997—5009.
32. Dziewonski A. M., Franzen J. E., Woodhouse J. H. Centroid-moment tensor solutions for July—September, 1983//Phys. Earth. Planet. Inter., 1984. V. 34. P. 1—8.
33. Dziewonski A. M., Franzen J. E., Woodhouse J. H. Centroid-moment tensor solutions for October—December, 1984//Phys. Earth Planet. Inter. 1985. V. 39. P. 147—156.
34. Harkrider D. Surface waves in multilayered elastic media. II//Bull. Seismol. Soc. Amer. 1970. V. 60. № 6. P. 1937—1938.
35. Hartzell S. H., Heaton T. H. Teleseismic time functions for large, shallow subduction zone earthquakes//Bull. Seismol. Soc. Amer. 1985. V. 75. № 4. P. 965—1004.
36. Kanamori H., Anderson D. L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology//Bull. Seismol. Soc. Amer. 1975. V. 65. № 6. P. 1073—1095.
37. McGuire R. A simple model for estimating Fourier amplitude spectra of horizontal ground acceleration//Bull. Seismol. Soc. Amer. 1978. V. 68. № 3. P. 803—822.
38. Miyatake T. Earthquake source process and aftershock activity//J. Seismol. Soc. Jap. 1985. V. 38. P. 67—79.
39. Stauder W., Mualchin L. Fault motion in the larger earthquakes of the Kurile-Kamchatka arc and of the Kurile-Hokkaido corner//J. Geophys. Res. 1976. V. 81. № 2. P. 297—308.
40. Tajima F., Kanamori H. Global survey of aftershock area expansion patterns//Phys. Earth Planet. Inter. 1985. V. 40. P. 77—134.
41. Teupser C. Seismological instruments developed in the Institute of Geodynamics. Jena//Proc. X Assembl. ESC. P. 11. Moscow. 1970. P. 448—461.

Институт вулканологии
ДВО АН СССР

Поступила в редакцию
9.IX.1986