

УДК 550.343.6

ФЕДОТОВ С. А., ЧЕРНЫШЕВ С. Д.

**20 ЛЕТ ДОЛГОСРОЧНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА
ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ: ДОСТОВЕРНОСТЬ
В 1981—1985 ГГ., В ЦЕЛОМ ЗА 1965—1985 ГГ.
И ПРОГНОЗ НА 1986—1990 ГГ.**

TWENTY YEARS OF LONG — TERM SEISMIC PREDICTION FOR THE KURIL-KAMCHATKA ARC: RELIABILITY IN 1981—1985, 1965—1985 AND PREDICTION FOR 1986—1990, by Fedotov S. A. and Chernyshev S. D. This paper offers an evaluation of long-term seismic prediction for the Kuril-Kamchatka arc made according to S. A. Fedotov's method (1965, 1968) in 1965—1985. The forecast of earthquakes with $M \geq 7^{3/4}$ and seismic activity A_{10} , showing the seismicity level, turned out to be successful. Less confident were evaluations of arc section arrivals into the foreshock stage of earthquakes with $M \geq 7^{3/4}$ and also the probability of earthquakes with $M = 5^{3/4} - 7$. The reasons for such deviations are discussed. Methods of further improvement of seismic prediction are considered. The long — term seismic prediction for the Kuril-Kamchatka arc is given for the period of 1986—1990.

(Received July 29, 1987)

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

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

В 1963—1964 гг. было начато сравнительное исследование имевшихся к тому времени данных о сейсмичности областей очагов курило-камчатских и японских землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, и начат поиск связанных с ними закономерностей. Сильнейшие землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$ являются главными событиями в сейсмическом процессе. Велось сравнительное изучение сейсмичности в областях очагов землетрясений Курильских островов, Камчатки и Японии с $M \geq 7^{3/4}$ по имевшимся к тому времени данным [10, 11]. Краткий очерк этих исследований приводился ранее [14].

Была установлена закономерность в размещении очагов сильнейших землетрясений, проявляющаяся в том, что землетрясения такой силы имеют тенденцию происходить в тех местах сейсмогенной зоны, где их не было в течение многих десятилетий или столетий [10]. Было введено понятие сейсмического цикла, подразумевающее закономерное изменение сейсмичности в некоторой области между землетрясениями предельной силы, захватывающими эту область, и найдены его свойства [11]. Все это позволило в начале 1965 г. предложить методику долгосрочного сейсмического прогноза и составить такой прогноз для Курило-Камчатской дуги и Северо-Восточной Японии на четыре пятилетия, 1965—1985 гг. [11]. Методика излагалась в предыдущих работах [10, 11]. Прогноз впоследствии 3 раза уточнялся по пятилетиям — на 1971—1975, 1976—1980 и 1981—1985 гг. [12—14]. В 1980 г. правила, по которым строились границы очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, были проверены и формализованы в большей мере, чем первоначальные, благодаря чему стали точнее выделяться места следующих таких землетрясений. Были

также проверены свойства сейсмического цикла, позволяющие прогнозировать величины сейсмической активности A_{10} и оценивать вероятности землетрясений с магнитудами $M=5\frac{3}{4}-7\frac{1}{2}$ [14]. В 1965—1980 гг. долгосрочный сейсмический прогноз успешно оправдывался.

Методика может применяться для долгосрочного сейсмического прогноза сильных землетрясений и уровня сейсмичности не только в Курило-Камчатской и Японской островных дугах, но и в других областях поддвига литосферных плит, а также в больших однородных сейсмических областях с иной тектоникой.

Вероятные места следующих сильных землетрясений, выделяемые предложенным способом [10], получили в мировой литературе название «seismic gaps». Их определение с успехом ведется во многих странах мира, что было показано, например, на специально посвященной этому вопросу конференции, которая проходила при Массачусетском политехническом институте в 1978 г. [24]. Другая часть нашей методики, основанная на свойствах сейсмического цикла, использовалась в мировой сейсмологии в значительно меньшей степени.

В данной статье рассматриваются следующие вопросы: другие методики долгосрочного сейсмического прогноза; оценка достоверности долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на 1981—1985 гг.; оценка эффективности методики в целом за прошедшие 20 лет ее применения (1965—1970, 1971—1975, 1976—1980, 1981—1985 гг.); уточнение долгосрочного сейсмического прогноза на 1986—1990 гг.; сопоставление сделанного прогноза с другими оценками сейсмической обстановки и обсуждение возможных путей совершенствования методики.

Другие способы, применявшиеся для долгосрочного сейсмического прогноза землетрясений Курило-Камчатской дуги

Проблемы выделения опасных участков для районов островных дуг и краев тектонических плит и создания методик долгосрочного прогноза стали рассматриваться с конца 60-х годов многими авторами [2—4, 6, 7, 16—26]. Кратко рассмотрим ряд методик, применявшихся для прогноза курило-камчатских землетрясений.

В работах М. Висса и Р. Е. Хабермена [26] предложен интересный анализ форшоковой сейсмичности, основанный на выделении зон пониженной сейсмической активности. На примере различных регионов показано, что перед сильными землетрясениями могут возникать долгоживущие зоны затишья, причем период затишья зависит от магнитуды ожидаемого землетрясения. Для участков Средних и Северных Курильских островов были выделены две опасные зоны, расположенные между очагами землетрясений 1952 и 1963 гг. и разделенные проливом Крузенштерна (расстояние вдоль дуги $\Delta=1000$ км) (рис. 1). Указывался также период продолжительностью 19 лет, во время которого можно ожидать большое землетрясение: 1979—1997 гг. Указанная методика интересна тем, что использует простые алгоритмы, однако она не позволяет выделять места следующих сильных землетрясений с достаточной точностью. Это связано с тем, что для рассмотрения выбираются прямоугольные области, захватывающие всю дугу по ширине, и не учитывается расположение границ очагов сильнейших землетрясений.

В работах В. И. Кейлиса-Борока и В. Г. Кособокова с соавторами [3, 6] используется методика, являющаяся решением задачи классификации с обучением. Она основана на введении ряда параметров, статистическая обработка которых позволяет выделять районы, где возможны землетрясения с $M \geq 8,2$. После создания основного варианта [3] методика дорабатывалась и улучшалась — магнитудный порог был уменьшен до $M=8,0$, число параметров сокращено от шести до двух. В работе

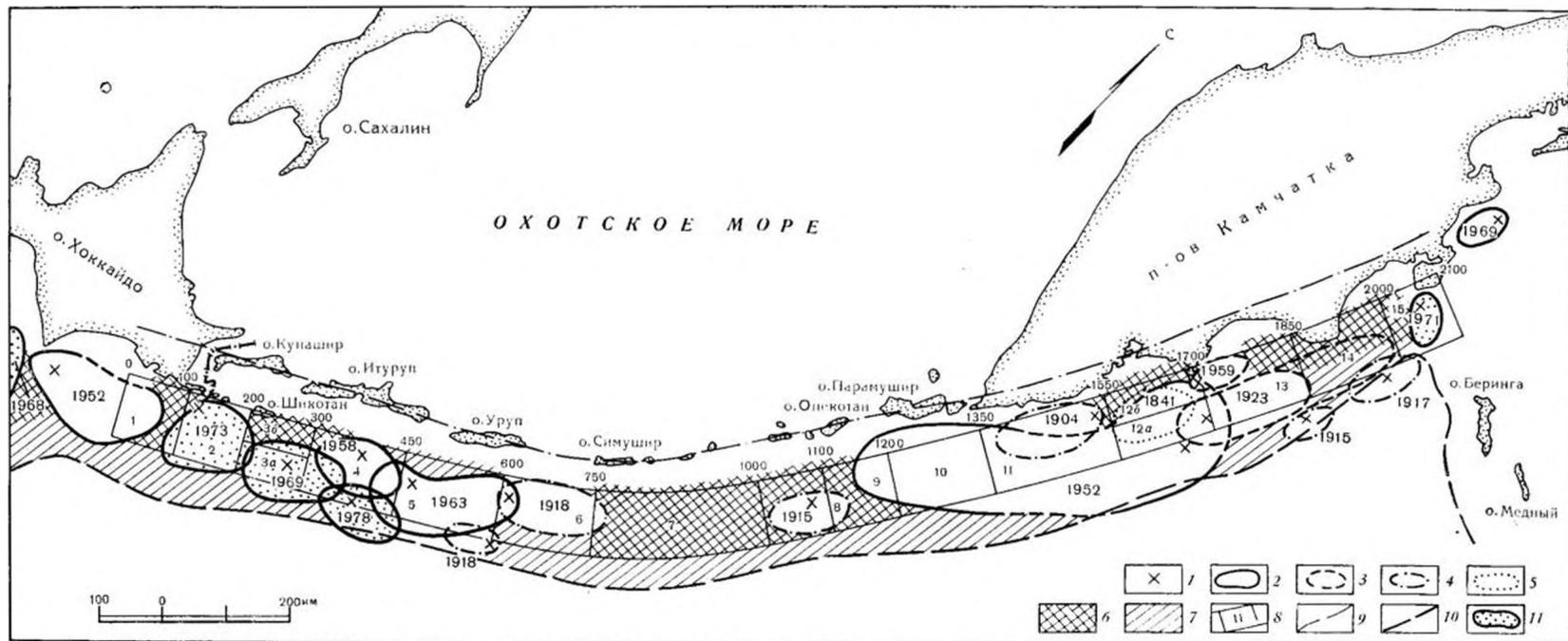


Рис. 1. Карта очагов Курило-Камчатских землетрясений 1904—1980 гг. с $M \geq 7^{3/4}$, $H \leq 80$ км и вероятных мест следующих таких землетрясений. 1—инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$; 2—границы областей очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, проведенные с точностью ± 10 км; 3—участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 4—вероятные области очагов землетрясений 1904—1918 гг. $M \geq 7^{3/4}$; 5—предполагаемая область очага землетрясения 1841 гг.; 6—наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$; 7—возможные места следующих таких землетрясений; 8—участки полосы прогноза и их номера (названия см. в табл. 1); 9—оси глубоководных желобов; 10—ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 11—область очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, происшедших в 1965 г. в местах, которые считались наиболее вероятными для таких землетрясений

[6] предложен способ выделения периодов повышенной вероятности возникновения землетрясений с $M \geq 8,0$, с помощью которого существенно сокращен пространственно-временной объем ожидания таких землетрясений. Недостатком этой методики является, на наш взгляд, то, что вся сейсмогенная зона, имеющая большую площадь поперечного сечения (размеры 200×100 км), заменяется проекцией на линию, образованную глубоководными желобами и континентальными склонами. При этом не учитывается возможность того, что в одном участке островной дуги на разных расстояниях от глубоководного желоба может размещаться несколько областей очагов сильнейших землетрясений, и задача является по крайней мере двумерной. Типичным примером такого расположения могут служить очаги землетрясений 06.XI 1958 г. с $M=8,2$ и роя землетрясений 22—24.III 1978 г. с $M_{\max}=8,0$ на Южных Курилах против о-ва Итуруп (см. рис. 1).

В. А. Широковым был предложен хорошо зарекомендовавший себя способ выделения периодов повышенной вероятности возникновения сильных землетрясений ($M \geq 7,0$), а также вулканических извержений на Камчатке и Северных Курильских островах. Методика основана на выделении активных фаз в периоде изменения склона Луны, равном 18,613 г. [16, 19]. Для землетрясений с $M \geq 7,0$ указываются интервалы времени длительностью в несколько лет, в которых такие землетрясения ожидаются с вероятностью, в 9—10 раз превышающей среднюю. Указанная методика используется как дополнение к долгосрочному сейсмическому прогнозу, обсуждаемому в настоящей статье.

В работе А. М. Шурыгина и М. Г. Одинец [17] дан интересный статистический анализ сейсмичности Курил и выявлен средний период повторения сгустков землетрясений с $M \geq 6,0$, равный $T=5,5$ лет. Длина периода обусловлена в основном сейсмичностью Южных Курил за последние 30 лет. Алгоритм прогноза остроен так, что выделенный период $T=5,5$ лет в существенной степени определяет время прогнозируемых землетрясений с $M \geq 7,3$, что по-видимому, не совсем правомерно, так как для других районов Курило-Камчатской дуги указанный период не характерен. Место ожидаемого землетрясения также сильно зависит от расположения сгустков предшествующих землетрясений с $M \geq 6,0$, что обуславливает постоянную опасность Южных Курил. Как и в ряде других работ, сейсмогенная зона рассматривается в виде проекции на ось островной дуги. Необходимо отметить, что с 1975 по 1986 г. прогноз оправдался в трех случаях из пяти. Ретроспективный прогноз на 1975—1982 гг., по данным за 1936—1974 гг., дал два правильных предсказания землетрясений с $M \geq 7,3$ (1975 и 1978 гг.) и одну «ложную тревогу». Прогноз на 1983—1987 гг. давал два периода повышенной вероятности возникновения сильных землетрясений для Южных Курил — 1983—1984 гг. и 1986 г. Прогноз на 1984 г. можно считать оправдавшимся (см. следующий раздел статьи). Прогноз на 1986 г. не подтвердился — землетрясений с $M \geq 7,3$ на Южных Курилах не было.

В работе А. Д. Завьялова [4] дается схема использования параметра концентрации сейсмогенных разрывов $K_{ср}$ для прогноза землетрясений с энергетическим классом $K_{1,2}^{\Phi} \geq 13,5$ ($M \geq 6,0$) для Камчатки. Исследуется поведение параметра $K_{ср}$ перед 29-ю такими землетрясениями за период 1962—1982 гг. В качестве прогностического признака было выбрано понижение величины параметра $K_{ср}$ за несколько лет до ожидаемого землетрясения. Размеры областей, в которых объявляются периоды ожидания землетрясений, варьируются в зависимости от порогового уровня $K_{ср}$ в пределах от $1,0 \pm 0,06\%$ до $18,8 \pm 2,8\%$ от площади всего рассматриваемого региона. Методика дала положительные результаты при прогнозе мест камчатских землетрясений средней силы ($M \approx 6$), но имеет ряд дискуссионных положений. Уменьшение концентрационного критерия $K_{ср}$, которое считается прогностическим признаком, пропорцио-

нально росту числа очагов землетрясений в рассматриваемом объеме, т. е. сейсмической активности в нем за время, прошедшее с выбранного момента его отсчета. Подобный прогноз сходен с простой оценкой вероятности сильных землетрясений по графику повторяемости. Не учитываются такие явления, как сейсмическое затишье и залечивание разрывов, которое может играть существенную роль при длительной подготовке больших землетрясений.

Другие подходы к проблеме долгосрочного сейсмического прогноза, в том числе основанные на геодезических данных, приведены в ряде книг [18, 22, 24, 25; и др.]. Указанные работы в той или иной степени представляют интерес в качестве дополнения к методике долгосрочного прогноза, применяемой нами для Курило-Камчатского региона.

Перейдем к оценке результатов прогноза, дававшегося на предыдущее пятилетие, 1981—1985 гг.

Оценка достоверности прогноза на 1981—1985 гг.

В 1983 г. был опубликован уточненный долгосрочный прогноз для Тихоокеанской фокальной зоны у берегов Камчатки и Курильских островов на 1981—1985 гг. [13]. Ранее аналогичный прогноз давался, начиная с 1965 г., на предшествующие пятилетия [11, 12, 14]. Во всех случаях прогнозировалась сейсмичность на глубине 0—80 км.

Для всей Курило-Камчатской дуги указывались наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$. На рис. 1 приведена карта Курило-Камчатской дуги и дано расположение очагов сильнейших землетрясений ($M \geq 7\frac{3}{4}$) за последние 150 лет. Участки дуги с различной штриховкой соответствуют различной вероятности ожидания подобных землетрясений в будущем. Для землетрясений с $M < 7\frac{3}{4}$ и величин сейсмической активности A_{10} прогноз давался для полосы максимальной сейсмичности шириной 100 км, северо-западная граница которой отстоит на расстоянии 50 км от оси вулканического пояса. Полоса прогноза разделена в соответствии с расположением очагов землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$ и состоит из 15 участков, в каждом из которых уровень сейсмичности обусловлен соответствующей стадией сейсмического цикла и может быть предсказан по графикам изменения сейсмической активности $A_{10}(t)$ и сбрасывания сейсмической энергии $D(t)$ в течение цикла [11, 12]. Два участка — № 3, напротив о-ва Шикотан, и № 12, напротив Авачинского залива, разделены вдоль дуги на две части — юго-восточную (а) и северо-западную (б), так как здесь в части полосы прогноза, прилегающей к побережью, остается достаточно пространства для больших землетрясений. Для всей полосы прогноза в табл. 1 приведены следующие величины: расстояния Δ в км, отсчитываемые вдоль дуги, см. рис. 1; ожидавшиеся стадии сейсмического цикла (I — стадия афтершоков, II — стадия стабильного сейсмического режима, III — стадия форшоков); оценка вероятности того, что участок вступил в стадию форшоков; прогнозировавшиеся с вероятностью 0,7 интервалы значений сейсмической активности A_{10} и их средние величины; нижние пределы магнитуд землетрясений, ожидавшихся с вероятностями 0,8; 0,5 и 0,15, и максимальные возможные магнитуды для наиболее опасных мест. В последних графах указаны величины A_{10} и магнитуды сильнейших землетрясений, наблюдаемых в 1981—1985 гг. в каждом из участков, а также приведена оценка прогноза.

На период 1981—1985 гг. у берегов Камчатки и Курильских островов указывалось шесть мест, в которых наиболее вероятны землетрясения с $M \geq 7\frac{3}{4}$. Это участки № 126 ($\Delta = 1550—1700$ км) — напротив Авачинского залива, № 36 ($\Delta = 200—300$ км) — о-в Шикотан, № 7 ($\Delta = 750—1000$ км) и о-в Симушир — пролив Крузенштерна, № 14 ($\Delta = 1850—2000$ км) — Камчатский залив, № 9 ($\Delta = 1100—1200$ км) — район о-ва

Таблица 1

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской фокальной зоны на 1981—1985 гг. и его проверка ($r=50-150$ км, $h \leq 80$ км)

Участок, № (см. рис. 1)	Район	Δ, км	Стадия цикла и ее оценка по данным 1976—1980 гг.			Прогноз на 1981—1985 гг.						Действительность, 1981—1985 гг.		Оценка прогноза					
			стадия	P (A ₁₀)	P (D)	P (A ₁₀)·P(D)	A ₁₀ (P~0,7)		M				A ₁₀	M	A ₁₀ P~0,7	M P~0,8	M P~0,5		
							\bar{A}_{10}	$\bar{A}_{10} \pm \sigma$	P~0,8	P~0,5	P~0,15	P(M ≥ 7/4), %						M _{max}	
1	Мыс Сириха — п-ов Немуро	0—100	III	0,7	0,99	0,69	1,2—3	0,8—4,5											
2	П-ов Немуро—о-в Зеленый	100—200	I				2,0	1,3—3,0	6 ^{1/4} —6 ^{1/2}	7	7 ^{1/4} —7 ^{1/2}	∇ ₅	7 ^{3/4}	0,61	4,4				
3а	О-в Шикотан, Ю-В	200—300	I				1,4	0,9—2,1	6 ^{1/4}	6 ^{3/4}	7—7 ^{1/4}	∇ ₅		1,07	5,3	+	—	—	—
3б	» С-З	200—300	III	0,24	0,76	0,18	1,2—3	0,8—4,5				∇ ₅	7 ^{3/4} —8	1,50	6,7				
4	О-в Итуруп	300—450	I→II				1,3	0,9—2,0	6	6 ^{1/2}	7	∇ ₅		3,68	7,5	—	+	+	+
5	Пролив Фриза—о-в Уруп	450—600	II				1,2	0,8—1,9	6	6 ^{1/2}	7	∇ ₅		1,24	5,8	+	+	*	—
6	Мыс Кастрикум — пролив Буссоль	600—750	II				1,2	0,8—1,9	6	6 ^{1/2}	7	∇ ₅		0,86	6,1	+	+	—	—
7	О-в Симушир — пролив Кру-зенштерна	750—1000	III	0,46	0,57	0,26	1,2—3	0,8—4,5				∇ ₅	8 ^{1/4} —8 ^{1/2}	1,04	6,7				
8	О-в Шишкотан	1000—1100	II				1,2	0,8—1,9	5 ^{3/4}	6 ^{1/4}	6 ^{3/4}	∇ ₅		1,22	5,5	+	—	*	—
9	О-в Онекотан — пролив 3-й Курильский	1100—1200	III	0,67	0,64	0,43	1,2—3	0,8—4,5				∇ ₅	8	2,00	6,6				
10	О-в Парамушир — мыс Лопатка	1200—1350	II				1,2	0,8—1,9	6	6 ^{1/2}	7	∇ ₅		0,86	5,4	+	—	—	—
11	Юг Камчатки	1350—1550	II				1,2	0,8—1,9	6	6 ^{1/2}	7	∇ ₅		1,02	5,3	+	—	—	—
12а	Зал. Авачинский—п-ов Шипунский, Ю-В	1550—1700	II				1,2	0,8—1,9	6	6 ^{1/2}	7	∇ ₅		1,24	5,8	+	—	—	—
12б	То же С-З	1550—1700	III	0,03	0,44	0,04	1,2—3	0,8—4,5			6 ^{3/4} —7	∇ ₅	8	2,61	5,7				
13	Зал. Кроноцкий	1700—1850	II				1,2	0,8—1,9	6	6 ^{1/2}	7	∇ ₅		1,53	5,6	+	—	—	—
14	П-ов Кроноцкий—зал. Камчатский	1850—2000	II				1,2	0,8—1,9	6	6 ^{1/2}	7	∇ ₅		2,24	6,7				
15	П-ов Камчатский	2000—2100	I→II	0,52	0,7	0,36	1,2—3	0,8—4,5	6 ^{3/4} —7	6 ^{1/4}	6 ^{3/4}	∇ ₅	8 ^{1/4}	1,33	6,8	+	+	+	+

Примечание: 1) Знаки вопроса для участков, проходящих, по предположению, III стадию, означают, что нельзя достоверно сказать, проходят ли эти районы действительно стадию фокусков; 2) в графе «Оценка прогноза» для участков 5 и 8, помеченных знаком *, энергия происшедших землетрясений с $5 < M < 6$ эквивалентна энергиям землетрясений с $M=6$ и $M=5,4$ соответственно.

Курило-Камчатские землетрясения 1981—1986 гг. с $M \geq 7$ и $H \leq 80$ км

Год	Дата	Ч., мин., с.	Район	φ_N	λ_E	H, км	M
1982	30.VI	01.57.34	Напротив о-ва Уруп	44,6	151,2	31	7,1
1984	24.III	09.44.01	Напротив о-ва Итуруп	44,0	148,3	42	7,5
1984	28.XII	10.37.47,5	Напротив мыса Африка (Камчатка)	52,26	163,77	0—5	7,5

Онекотан и № 1 ($\Delta=0-100$ км)—район п-ова Немуро (см. рис. 1, табл. 1).

Некоторые из этих участков могли проходить III стадию сейсмического цикла (стадию форшоков), длящаяся 10—15 лет. Вероятность этого приближенно оценивается величиной произведения $B=P(A_{10}) \cdot P(D)$. Здесь A_{10} —сейсмическая активность, D —отношение сейсмической энергии, выделившейся на данной площади в рассматриваемый интервал времени, к сейсмической энергии, которая в среднем выделяется в исследуемой сейсмической области на равной площади за такое же время. В табл. 1 $P(A_{10})$ —вероятность того, что A_{10} (1976—1980) $> A_{10}(II)$, где A_{10} (1976—1980 гг.)—сейсмическая активность участка за указанные годы, $A_{10}(II)$ —средняя сейсмическая активность на II стадии сейсмического цикла (стадии стабильного режима); $P(D)$ —вероятность неравенства D (1976—1980 гг.) $> D(10-5)$, где D (1976—1980 гг.)—величина D для рассматриваемого участка за указанные годы, $D(10-5)$ —среднее значение D для равного по площади участка за 10—5 лет до землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$. Величина A_{10} и D имеют большой разброс, а подготовка части больших землетрясений не сопровождается усилением сейсмической деятельности в их очагах и на их периферии [11, 14]. Но в среднем, чем меньше произведение B , тем больше возможность того, что рассматриваемая вероятная область землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$ вступила в стадию форшоков. Для участков, находящихся во II стадии цикла или в начале III стадии, в среднем $B \geq 0,25$. Если же отклонения A_{10} и D от среднего уровня в большую сторону выходят за величину стандартного отклонения σ , то $B < 0,03$, и вероятность того, что происходит подготовка землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$, достаточно высока. Судя по этому признаку, среди шести вероятных участков следующих таких землетрясений, сейсмических брешей в полосе прогноза, стадию форшоков мог проходить участок № 126—район Авачинского залива ($B=0,04$). В остальных пяти участках $B=0,18-0,69$ (см. рис. 1, табл. 1).

В Курило-Камчатской области в 1981—1985 гг. не произошло землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$. Землетрясений с $7,0 < M < 7,7$ было три: 30.VI 1982 г. с $M=7,1$, напротив о-ва Уруп, вблизи глубоководного желоба, 24.III 1984 г. с $M=7,5$ напротив о-ва Итуруп, между очагами землетрясений 06.XI 1958 г. и 11.VIII 1969 г. с $M=8,2$ и роем землетрясений 22—24.III 1978 г. с $M=7,1-8,0$ и землетрясение 28.XII 1984 г. с $M=7,5$ напротив мыса Африка на Камчатке. Сведения об этих землетрясениях приведены в табл. 2 и на рис. 2 (см. ниже).

Необходимо отметить, что на возможность в 1983—1984 гг. землетрясения с $M \geq 7,3$ напротив о-ва Кунашир указывалось в прогнозе А. М. Шурыгина и М. Г. Одинец [17]. Хотя землетрясение 24.III 1984 г. произошло примерно в 200 км восточнее указанного в статье места, прогноз все же можно считать оправдавшимся, так как эпицентр лежит на восточной границе 300-километровой области, в которой ожидалось землетрясение.

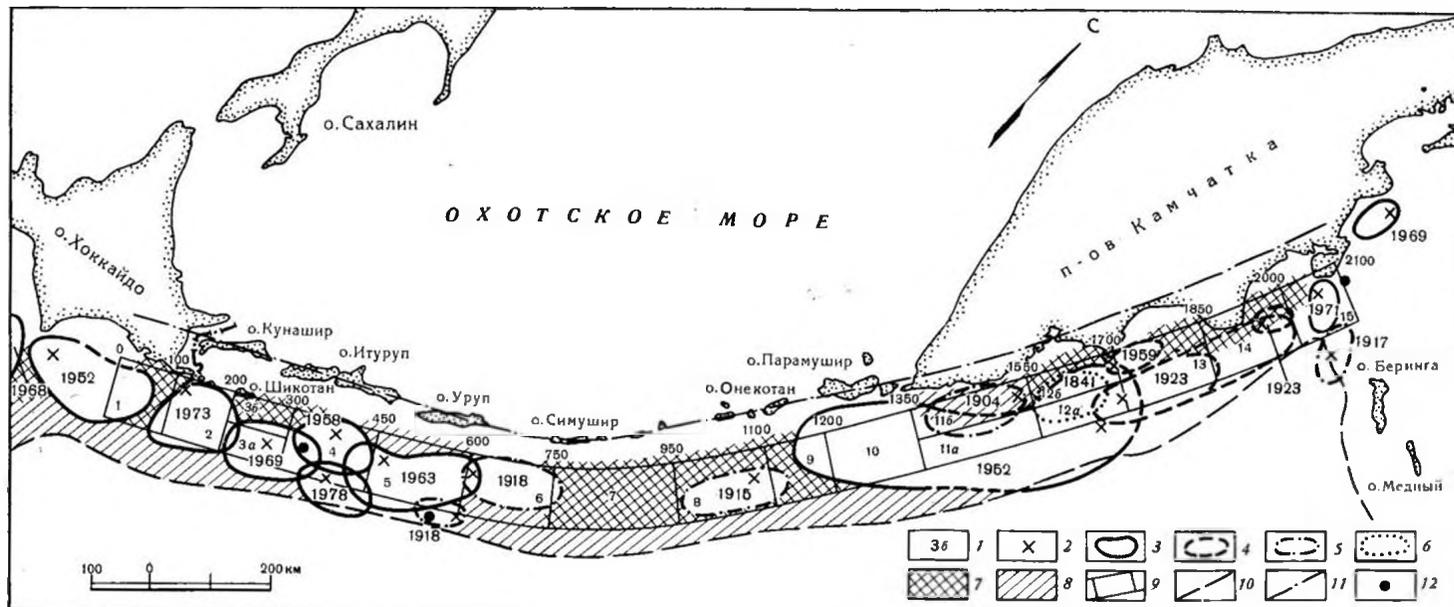


Рис. 2. Карта очагов Курило-Камчатских землетрясений 1904—1985 гг. с $M \geq 7^{3/4}$, $H \leq 80$ км и вероятных мест следующих таких землетрясений. 1—номер участка (названия см. в табл. 5); 2—инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$; 3—границы областей очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, проведенные с точностью ± 10 км; 4—участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5—вероятные области очагов землетрясений 1904—1918 гг. с $M \geq 7^{3/4}$; 6—предполагаемая область очага землетрясения 1841 г.; 7—наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$; 8—возможные места следующих таких землетрясений; 9—граница полосы прогноза; 10—оси глубоководных желобов; 11—ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 12—эпицентры землетрясений с $7,0 < M < 7,7$, происшедших в 1981—1985 гг.

Очаг землетрясения 28.XII 1984 г. с $M=7,5$ у побережья Камчатки заполнил часть пространства между очагами Усть-Камчатского землетрясения 15.XII 1971 г. с $M=7,8$ и Озерновского землетрясения 22.XI 1969 г. с $M=7,7$. Положение эпицентра этого землетрясения показывает, что в районе Камчатского полуострова продолжается разрядка напряжений, начавшаяся Озерновским землетрясением 22.XI 1969 г. Однако, так как уровень сейсмичности в этом районе достаточно низкий, трудно достоверно говорить о возможности там землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$.

В последних графах табл. I для каждого из 15 участков приведены фактические значения сейсмической активности A_{10} за 1981—1985 гг. и указаны магнитуды сильнейших землетрясений, происшедших в эти годы. Данные о землетрясениях взяты из сборников «Землетрясения в СССР» [5], ежеквартальных сборников «Сейсмологический бюллетень Дальнего Востока» [9] и регионального каталога землетрясений Камчатки. В графах «Оценка прогноза» отмечен успех (+) или неудача (—) прогноза для всех случаев, когда прогноз давался для участков, проходящих стадию афтершоков (I) или стадию стабильного сейсмического режима (II).

Значения сейсмической активности A_{10} в девяти случаях из 11 оказались в пределах, прогнозирувавшихся с вероятностью 0,7. Для участка № 2 ($\Delta=100-200$ км) более низкий, чем ожидалось, уровень сейсмической активности $A_{10}=1,22$ может означать, что стадия афтершоков (I) землетрясения 17.VI 1973 г. с $M=7,9$ почти завершилась и участок № 2 переходит в длительную стабильную стадию II. Аномально высокое значение сейсмической активности $A_{10}=3,68$ для участка № 4 ($\Delta=300-450$ км) может быть связано с землетрясением 24.III 1984 г. с $M=7,5$, которое в свою очередь может быть вызвано продолжающейся разрядкой напряжений в сложной напряженной зоне, находящейся между очагами больших землетрясений 1958, 1969 и 1978 гг.

Прогноз магнитуд землетрясений оказался менее успешным, чем прогноз сейсмической активности. Землетрясения с магнитудами $M=5^{3/4}-6^{1/2}$, ожидавшиеся с вероятностью 0,8, произошли в трех случаях из 11, а землетрясения с магнитудами $M=6^{1/4}-7$, ожидавшиеся с вероятностью 0,5, произошли в двух случаях из 11. Для участков № 5 ($\Delta=450-600$ км) и № 8 ($\Delta=1000-1100$ км) суммарная энергия происшедших землетрясений с $5 < M < 6$ эквивалентна магнитудам землетрясений, ожидавшихся для этих участков с вероятностью 0,8. Однако формально можно считать, что прогноз магнитуд для этих участков был неудачен.

В главном оценка долгосрочного сейсмического прогноза, сделанного для Курило-Камчатской дуги на 1981—1985 гг., сводится к следующему. В это пятилетие не представилась возможность проверить прогноз вероятных мест землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, так как их не было. Прогноз сейсмической активности, которая представляет прежде всего нормированное число слабых землетрясений, оправдался в девяти случаях из 11 при вероятности прогноза 0,7. Землетрясения с $M=5^{3/4}-6^{1/2}$, ожидавшиеся с вероятностью 0,8, произошли только в трех — пяти случаях из 11. Последнее обстоятельство в значительной мере объясняется тем, что в 1981—1985 гг. в Курило-Камчатской области было относительно сейсмическое затишье, количество высвободившейся сейсмической энергии и землетрясений с $M \geq 6$ было существенно ниже среднего.

Общая оценка достоверности долгосрочного прогноза за 20 лет, 1965—1985 гг.

Далее рассмотрим эффективность применяемой методики долгосрочного сейсмического прогноза за все 20 лет ее использования в Курило-Камчатской области: 1965—1970, 1971—1975, 1976—1980 и 1981—1985 гг. На эти четыре пятилетия для всей сейсмогенной зоны длиной

Инструментальные данные о сильнейших землетрясениях ($M \geq 7^{3/4}$, $H \leq 80$ км) Курильских островов, Камчатки и Северо-Восточной Японии, происшедших в 1965—1985 гг.

Год	Дата	Ч. мин, с	Район	φ_N	λ_E	H, км	M
1968	6.V	00.48.53	Восточнее севера о-ва Хонсю	40,73	143,58	0	7,9
1969	11.VIII	21.27.36 \pm 2	Восточнее о-ва Шикотан	43,6 \pm 0,2	147,8 \pm 0,2	40 \pm 10	8,2 \pm 0,2
1969	11.VIII	21.27.41 \pm 5	Там же	43,6 \pm 0,3	147,2 \pm 0,3	38 \pm 15	7,8 \pm 0,5
1971	15.XII	08.29.55 \pm 2	Восточнее п-ова Камчатский	55,85 \pm 0,1	163,35 \pm 0,1	20—30	7,8 \pm 0,1
1973	17.VI	03.55.02 \pm 1	Восточнее п-ова Немуро—Малой Курильской гряды	43,15 \pm 0,2	145,9 \pm 0,2	55 \pm 10	7,9 \pm 0,2
1978	23.III	03.15.23 \pm 1	Восточнее о-ва Итуруп	43,9	148,9	40	7,8
1978	24.III	19.47.50 \pm 1	Там же	43,9	149,1	39	8,0

2100 км давался прогноз вероятных мест следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, а для ее наиболее сейсмичной полосы шириной 100 км делались также оценки стадий сейсмического цикла, ожидаемых величин сейсмической активности A_{10} и вероятности землетрясений с $M < 7^{3/4}$. Сопоставление прогнозов этих величин с действительной сейсмичностью позволяет получить представительные оценки.

Рассмотрим в первую очередь размещение областей очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ и заполнение ими прогнозирувавшихся вероятных областей таких землетрясений, которые чаще стали называться в литературе сейсмическими брешами или «seismic gaps». Отметим, что по нашей методике их выделение производится более тщательно, чем это обычно делается.

В 1965—1985 гг. в той части Курило-Камчатской дуги, для которой давались прогнозы вероятных мест землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, (см. рис. 1), произошло четыре таких землетрясения: 11.VIII 1969 г. с $M = 8,2$ против островов Кунашир и Итуруп; 15.XII 1971 г. с $M = 7,8$ в Камчатском проливе между Камчаткой и о-вом Беринга; 17.VI 1973 г. с $M = 7,9$ против о-ва Кунашир и рой землетрясений 22—24.III 1978 г. с $M = 7,1—8,0$ против о-ва Итуруп (см. рис. 1, табл. 3). Все они произошли в тех местах Курило-Камчатской сейсмической зоны, где такие землетрясения ожидалось по долгосрочному прогнозу 1965 г. [10]. Кроме того, 6.V 1968 г., восточнее северной части о-ва Хонсю произошло землетрясение с $M = 7,9$ в той области, которая также была отнесена к наиболее вероятным местам следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, по тому же прогнозу [10]. Таким образом, такой прогноз оказался верным для всех пяти землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$, которые произошли в 1965—1985 гг. у Тихоокеанского побережья Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии. При создании методики предполагалось, что вероятность таких прогнозов будет примерно 0,8.

Далее рассмотрим эффективность долгосрочного прогноза сейсмичности в наиболее активной полосе.

Рассмотрим сначала те участки полосы, в которых в течение 80 лет и более не было землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$. По нашей методике допускается, что все они могут проходить III стадию сейсмического цикла (форшоков), которая длится 10—15 лет, и для них прогнозируются соответствующие величины A_{10} и M_{\max} (см. например, табл. 1). Вероятность того, что участок стал проходить стадию форшоков землетрясения с

Достоверность долгосрочного прогноза A_{10} и M для Курило-Камчатской дуги
в 1965—1985 гг.

Вероятность ожидания прогнозируемых значений A_{10} и M		Оправданность прогноза A_{10} и M за предыдущие пятилетия и в целом в 1965—1985 гг., %				
		1965—1970 гг.	1971—1975 гг.	1976—1980 гг.	1981—1985 гг.	1965—1985 гг.
A_{10}	$P=70\%$	86	50	73	82	73
M	$P=80\%$	86	86	73	27	65
M	$P=50\%$	43	50	27	18	32

Примечание. Прогноз A_{10} и M дается для наиболее сейсмичной полосы дуги шириной 100 км, рис. 1.

$M \geq 7^{3/4}$, оценивается по степени уменьшения произведения вероятностей $B = P(A_{10})P(D)$, как это описано в предыдущем разделе.

В прогнозах на 1971—1975, 1976—1980 и 1981—1985 гг. выделялось по оценкам за 1965—1980 гг. по шесть участков наиболее активной полосы, которые могли проходить III стадию цикла [12—14]. Среднее из 18 определений величины B имеет значение $B = 0.23 \pm 0.18$, где ± 0.18 — среднее квадратическое отклонение единичного определения B .

В пяти случаях из 18 наблюдались низкие значения $B = 0.01—0.05$. Землетрясения с $M \geq 7^{3/4}$ произошли в наиболее сейсмичной полосе дуги, именно в выделявшихся участках, т. е. прогноз места следующих таких землетрясений был верным. Таких землетрясений было только два на те 18 случаев, когда допускалась возможность III стадии цикла (см. землетрясения № 3 и 4, табл. 3). Естественно, что среднее значение $B = 0.23$ оказалось близким к его средней величине $B \approx 0.25$, характерной для IГ — начала III стадии. Однако значения B перед двумя названными землетрясениями с $M \geq 7^{3/4}$ равнялись 0,15 и 0,32 и признак B здесь не был показательным.

Из пяти низких значений $B = 0.01—0.05$ одно наблюдалось после землетрясения 17.VI 1973 г. с $M = 7.9$ в области его афтершоков, и его следует исключить как аномальное. Одно значение наблюдалось в 1971—1975 гг. в районе о-ва Онекотан, участок № 9 $\Delta = 1100—1200$ км и еще одно в районе п-ова Кроноцкий, участок № 14 $\Delta = 1850—2000$ км (см. рис. 1). Наибольшее внимание привлекают два оставшихся значения $B = 0.03—0.04$, которые устойчиво сохранялись в Авачинском заливе в прогнозах на 1976—1980 и 1981—1985 гг. (по оценкам за 1971—1980 гг.), участок 126 (см. табл. 1), $\Delta = 1550—1700$ км (см. рис. 1). Кроме того, в прогнозе на следующее пятилетие, 1986—1990 гг. (см. последний раздел статьи), по оценке за 1981—1985 гг. опять можно выделить участки № 9, 126 и 14.

Значения сейсмической активности A_{10} прогнозировались с вероятностью 0,7 по графику изменения сейсмического цикла [11, 14]. Для участков, проходящих I или II стадии сейсмического цикла (стадию афтершоков и стадию стабильного сейсмического режима) величины A_{10} были предсказаны в 27 случаях из 37, т. е. в 73% случаев (табл. 4). Напомним, что сейсмическая активность A_{10} в нашем случае — это число землетрясений энергетического класса $K_{SI,2}^{Ф_{10}^{0.8}} = 10 \pm 0.5$ (или $M = 3.6 \pm 0.3$) в год на площади 10^3 км².

Как можно видеть, действительная вероятность прогноза числа слабых землетрясений для участков Тихоокеанского побережья Камчатки и Курильских островов протяженностью 100—250 км по пятилетним интервалам времени почти совпала с ожидаемой.

Вероятность землетрясений с $M = 5^{3/4}—7$ в разных участках сейсмогенной зоны оценивается при помощи графика высвобождения сейсмической энергии $D(t)$ в течение сейсмического цикла.

Землетрясения с магнитудой $M=5\frac{3}{4}-6\frac{1}{4}$, ожидавшиеся с вероятностью 0,8 в течение пятилетних интервалов времени в выделенных участках Курило-Камчатской дуги, произошли в 24 случаях из 37, т. е. в 65% случаев; землетрясения с $M=6\frac{1}{4}-7$, ожидавшиеся с вероятностью 0,5, произошли в 12 случаях из 37, т. е. в 32% случаев (см. табл. 4). Как видно в табл. 4, прогноз землетрясений с $M=5\frac{3}{4}-7$ был успешным в 1965—1970, 1971—1975 гг. и оказался наименее правильным в 1981—1985 гг. Как уже отмечалось, последнее расхождение в значительной мере объясняется снижением сейсмической деятельности по всей Курило-Камчатской дуге в 1981—1985 гг. В среднем за 20 лет для участков, проходивших I стадию (афтершоков) и II стадию (стабильного режима или обычной сейсмичности) сейсмического цикла, количество землетрясений с $M=5\frac{3}{4}-7$ оказалось меньшим, чем это ожидалось по графику высвобождения сейсмической энергии $D(t)$. Отметим другие возможные причины такого расхождения, кроме временного снижения сейсмичности в последнее пятилетие.

Статистика ухудшается также из-за группирования сильных землетрясений. Тому же способствует асимметрия в распределении величины D относительно среднего значения в течение сейсмического цикла. Эта асимметрия видна на сводном эмпирическом графике значений D в течение сейсмического цикла [14]. Она не принималась во внимание из-за большого разброса величин D . Однако мода графика $D(t)$ лежит ниже его среднего, что приводит к некоторому завышению прогнозируемых величин D и M .

Несмотря на эти отклонения, долгосрочный прогноз величин M по зависимости $D(t)$ значительно лучше прогноза по графикам повторяемости $\lg N = -b \cdot M + a = -\gamma K + c$, который дает величины M в среднем на 0,15 больше, чем по $D(t)$. Одна из причин этого расхождения в том, что график повторяемости не учитывает дефицита землетрясений с $M > 6$ на II стадии сейсмического цикла.

В целом долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги был успешным в 1965—1985 гг., его эффективность подтвердилась при 20-летней проверке.

Сейсмический прогноз на 1986—1990 гг.

При составлении долгосрочного сейсмического прогноза на следующее пятилетие, 1986—1990 гг., были внесены некоторые изменения в карту размещения очагов сильнейших курило-камчатских землетрясений (рис. 2).

При составлении прогноза в 1965 г. магнитуды землетрясений были взяты из «Атласа землетрясений в СССР» [1]. При уточнении методики прогноза в работе [14] и в дальнейшем магнитуды сильнейших землетрясений брались из «Нового каталога» [8]. Для 45 землетрясений Курило-Камчатского региона с $M_{\text{нк}} \geq 7,0$ (по «Новому каталогу») за период с 1911 по 1956 г. сопоставлены $M_{\text{атл}}$ (из «Атласа землетрясений...») с $M_{\text{нк}}$ из «Нового каталога». В среднем для всей дуги $\Delta M = M_{\text{нк}} - M_{\text{атл}} = 0,24 \pm 0,26$. Это означает, что при учете округления магнитуд «Атласа...» до $\frac{1}{4}$ и погрешности в определении магнитуд «Нового каталога», нижний предел магнитуд рассматриваемых сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона равен $M=7,8$. Исходя из этого область очага землетрясения 31.VII 1915 г. на Камчатке, имеющего $M=7,3$ в «Новом каталоге», снята с карты прогноза.

В работе [2] было предложено новое положение очага землетрясения 30.I 1917 г. с $M=8,1$ на севере Курило-Камчатской дуги. Оно рассматривается как более предпочтительное по сравнению с прежним.

В той же работе [2] сделана попытка уточнить границы области очага крупного Камчатского землетрясения 3.II 1923 г. с $M=8,5$. Однако

точных данных нет, не со всеми выводами работы [2] можно согласиться, и положение области очага землетрясения 3.II 1923 г. на Камчатке оставлено без изменений (см. рис. 1, рис. 2).

По-прежнему мы рассматриваем очаг этого землетрясения в двух вариантах, так как нельзя достоверно сказать, было ли землетрясение 24.II 1923 г. с $M=7,7$ («Новый каталог») самостоятельным событием или афтершоком основного землетрясения 3.II 1923 г. Условная область очага землетрясения 24.II 1923 г. с $M=7,7$ нанесена в северной части очага основного события с $M=8,5$ 3.II 1923 г.

Более тщательное рассмотрение афтершоков землетрясения 1.V 1915 г. с $M=8,3$ южнее о-ва Онекотан и учет графика зависимости $M(L)$ (рис. 3), дополненного новыми сведениями о размерах очагов девяти землетрясений Курил, Камчатки и Северо-Восточной Японии, позволило увеличить длину области очага этого землетрясения до 200 км. При этом участок № 7 — Средние Курилы, который является одним из вероятных мест следующих землетрясений с $M \geq 7,8$, уменьшился на 50 км.

Длительность сейсмического цикла принята равной 140 ± 60 лет, поэтому формально область очага роя землетрясений 25.VI 1904 г. с $M=7,7$ и 7,7 можно рассматривать с 1986 г. как потенциально опасную для следующего катастрофического землетрясения. Поэтому участок № 11 разделен на два, в одном из которых (№ 11б) предполагается стадия III.

В табл. 5 приведен долгосрочный сейсмический прогноз на текущее пятилетие 1986—1990 гг. для 15 участков наиболее активной полосы Курило-Камчатской дуги. Для всех 15 участков указаны стадии цикла (III стадия предположительно), которые они проходят, и дана качественная оценка наибольшей опасности для районов, предположительно проходящих стадию форшоков. По оценке $B=P(A_{10}) \cdot P(D)$ по данным за 1981—1985 гг. выделяются четыре из семи наиболее опасных участков, где $B=0,015-0,03$: участок № 9 ($\Delta=1100-1200$ км) — напротив о-ва Онекотан, № 14 ($\Delta=1850-2000$ км) — Кроноцкий полуостров — Камчатский залив, № 126 ($\Delta=1550-1700$ км) — Авачинский залив, № 36 ($\Delta=200-300$ км) — район о-ва Шикотан (см. табл. 5, рис. 2).

Вновь привлекает внимание район Авачинского залива, участок № 126, где в 1981—1985 гг., как и в 1971—1980 гг., отмечается низкое значение B .

Для всех семи участков, в которых предполагается возможность III стадии цикла, приведены значения максимальных возможных магнитуд M_{\max} .

Для остальных участков в соответствии со стадией цикла (I или II) по графикам $A_{10}(t)$ и $D(t)$ прогнозируются с вероятностью 0,7 интерва-

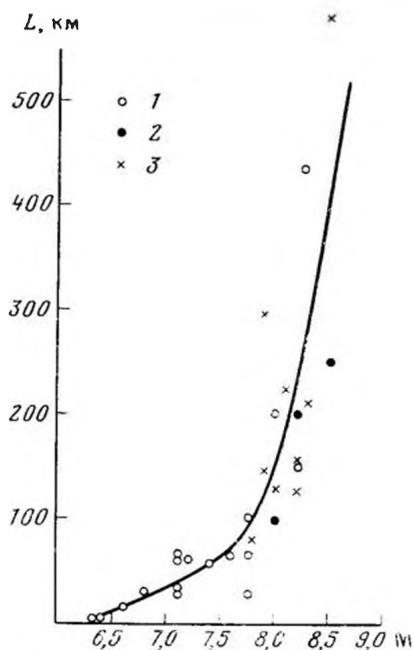


Рис. 3. Зависимость длины области очага L от магнитуды M для сильных землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса. 1 — величина L определена по данным полевых обследований [10]; 2 — величина L определена по размещению эпицентров форшоков и афтершоков [10]; 3 — величина L определена по размерам областей очагов землетрясений Курило-Камчатской дуги и Северо-Восточной Японии в 1952—1978 гг. [14], рис. 2

Таблица 5

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 1986—1990 гг. ($r = 50-150$ км, $h \leq 80$ км)

Участок, № (см. рис. 2)	Район	Δ , км	Стадия цикла и ее оценка по данным 1981—1985 гг.				Прогноз на 1986—1990 гг.						
			стадия	$P(A_{10})$	$P(D)$	$\frac{P(A_{10})}{P(D)}$	$A_{10} (P \sim 0,7)$		M				
							\bar{A}_{10}	$\bar{A}_{10} \pm \sigma$	$P \sim 0,8$	$P \sim 0,5$	$P \sim 0,15$	$P (M \geq 7^{3/4})$	M_{\max}
1	Мыс Сириха — п-ов Немуро	0—100	III?	0,96	0,99	0,95	1,2—3	0,8—4,5		6,5		> 5	$7^{3/4}$
2	П-ов Немуро — о-в Зеленый	100—200	I→II				1,3	0,9—2,0	6,1	6,6	7,1	≤ 5	
3а	О-в Шикотан, Ю-В	200—300	II				1,2	0,8—1,9	5,7	6,2	6,7	< 5	
3б	» С-З	200—300	III?	0,33	0,09	0,03	1,2—3	0,8—4,5		6,3		> 5	$7^{3/4}-8$
4	О-в Итуруп	300—450	II				1,3	0,9—2,0	6,0	6,5	7,0	≤ 5	
5	Пролив Фриза — о-в Уруп	450—600	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
6	Мыс Кастрикум — пролив Буссоль	600—750	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
7	О-в Симушир — пролив Крузенштерна	750—950	III?	0,67	0,33	0,22	1,2—3	0,8—4,5		6,7		> 5	$8^{1/4}$
8	О-в Шикотан	950—1100	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
9	О-в Онекотан — пролив 3-й Курильский	1100—1200	III?	0,13	0,12	0,015	1,2—3	0,8—4,5		6,5		≈ 5	$7^{3/4}-8$
10	О-в Парамушир — мыс Лопатка	1200—1350	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
11а	Юг Камчатки, Ю-В	1350—1550	II				1,2	0,8—1,9	5,8	6,3	6,7	< 5	
11б	» С-З	1350—1550	III?	0,69	0,95	0,65	1,2—3	0,8—4,5		6,5		> 5	8
12а	Зал. Авачинский — п-ов Шипуновский, Ю-В	1550—1700	II				1,2	0,8—1,9	5,7	6,2	6,7	< 5	
12б	То же, С-З	1550—1700	III?	0,04	0,64	0,025	1,2—3	0,8—4,5		6,4		≈ 5	8
13	Зал. Кроноцкий	1700—1850	II				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
14	П-ов Кроноцкий — зал. Камчатский	1850—2000	III?				1,2	0,8—1,9	5,9	6,4	6,9	< 5	
15	П-ов Камчатский	2000—2100	III?	0,08	0,24	0,02	1,2—3	0,8—4,5		6,6		≈ 5	$8-8^{1/4}$
			I→II				1,3	0,9—2,0	6,0	6,5	7,0	≤ 5	

Примечание. Знаки вопроса для участков, по предположению проходящих III стадию, означают, что нельзя достоверно сказать, проходят ли эти районы действительно стадий форошоков.

лы возможных значений сейсмической активности, а также нижние пределы магнитуд землетрясений, ожидающихся с вероятностями 0,8; 0,5 и 0,15.

Для района № 14 прогноз дан, как и прежде, в двух вариантах, так как не совсем ясно расположение северной границы области очага землетрясения 1923 г.

В дополнение к уточненному прогнозу по нашей методике приведем другие оценки сейсмической обстановки для Камчатки.

В работе [16] приводится долгосрочный сейсмический прогноз периодов пониженной и повышенной вероятности сильных землетрясений Камчатки с $M \geq 7,0$ на 1987—1992 гг., сделанный на основе наблюдений сейсмичности в течение периода изменения склонения Луны ($T = 18,61$ г.). По этому прогнозу с июля 1986 г. по август 1989 г. будет наблюдаться фаза покоя $P(N \geq 1, M \geq 7^{1/4}) \simeq 0,1$, $M_{\max} = 7^{1/4}$, а с сентября 1989 по сентябрь 1992 г. будет длиться активная фаза с повышенной вероятностью возникновения землетрясений с $M \geq 7,0$, $P(N \geq 1, M \geq 7,0) = 0,83$, $M_{\max} = 8^{1/2}$.

Наглядное представление о сейсмической обстановке в районе Камчатки дает кумулятивный график сейсмической энергии, высвобожденной в 1900—1986 гг., приведенный в [15]. Из него следует, что спокойное накопление упругой энергии для сейсмофокальной зоны Камчатки ($H < 100$ км) может продлиться максимум еще примерно 10 лет, после чего с большой вероятностью может наступить разрядка накопленных напряжений. Возможна серия землетрясений с $M \sim 8$.

Аналогичный график для Курильских островов показывает, что большая часть накопленной сейсмической энергии уже сброшена в основном серией южно-курильских землетрясений 1958—1978 гг., и сейчас район Курильских островов переходит в длительную стадию накопления сейсмической энергии.

Приведенная в той же работе [15] карта изолиний D за 1962—1983 гг. для Камчатки показывает расположение зон больших градиентов выделения сейсмической энергии за последние 22 года. Основные градиентные зоны приурочены к районам Авачинского залива и Кроноцкого полуострова. Все эти особенности показывают, что районы Авачинского залива и Кроноцкого полуострова в настоящее время действительно являются одними из самых опасных районов Курило-Камчатской дуги.

Заключение

Накоплен 20-летний опыт долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии, методика которого была изложена в 1965—1968 гг. [10, 11]. Главный вывод из его рассмотрения, которое было сделано выше, заключается в том, что прогноз был успешным и что имеется необходимость продолжать его.

Одновременно стало ясно, в какой мере достоверны разные стороны этого прогноза. С вероятностью больше предполагавшейся величины 0,8 выделялись места следующих землетрясений с $M \geq 7^{1/4}$. С ожидавшейся вероятностью 0,7 предсказывались значения сейсмической активности A_{10} в 15 участках полосы Курило-Камчатской дуги. Менее удачными были оценки вероятности вступления в длительную стадию форшоков тех участков, которые являются вероятными местами следующих землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ (сейсмическими брешами, «seismic gaps»), а также оценки вероятности землетрясений с $M = 5^{3/4}$ —7 в отдельных участках.

В данной работе внесен ряд улучшений в технику прогноза, и с их учетом составлен долгосрочный прогноз для Курило-Камчатской дуги на 1986—1990 гг.

Продолжая ведение долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги по применяемой методике [10, 11, 14; и др.], целесообразно одновременно совершенствовать его, для чего имеются различные возможности. В описанной методике мало использованы особенности миграции сейсмичности, связанные с подготовкой больших землетрясений. Необходимо тщательное изучение сейсмичности на III стадии сейсмического цикла, сейсмостатистики, исследование напряженного состояния в очагах больших землетрясений и во всей сейсмичной области и др. Такие исследования, применение развиваемой методики в других регионах со сходной сеймотектоникой и сочетание этой методики с иными способами долгосрочного сейсмического прогноза должны привести к повышению его надежности, детальности и предсказанию других характеристик сейсмичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас землетрясений в СССР (1911—1956 гг.). М.: Изд-во АН СССР, 1962. 337 с.
2. Викулин А. В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова//Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 72—83.
3. Гоцишани А. Д., Зелевинский А. В., Кейлис-Борок В. И., Кособоков В. Г. Распознавание участков Тихоокеанского пояса, где возможны сильнейшие землетрясения ($M \geq 8,2$)//Вычислительная сейсмология. Вып. 13. Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных. М.: Наука, 1980. С. 30—43.
4. Завьялов А. Д. Параметр концентрации сейсмогенных разрывов как предвестник сильных землетрясений Камчатки//Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 58—71.
5. Землетрясения в СССР//Ежегодники за 1981—1985 гг. М.: Наука, 1984, 1985, 1986, 1987.
6. Кейлис-Борок В. И., Кособоков В. Г. Периоды повышенной вероятности возникновения для сильнейших землетрясений мира//Вычислительная сейсмология. Вып. 19. Математические методы в сейсмологии и геодинимике. М.: Наука, 1986. С. 48—58.
7. Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии//Под ред. Асада Т.: Пер. с англ. М.: Недра, 1984. 312 с.
8. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 535 с.
9. Сейсмологический бюллетень Дальнего Востока//Ежеквартальные бюллетени за 1981—1984 гг. Южно-Сахалинск, 1982, 1984, 1985, 1986, 1987.
10. Федотов С. А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии//Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. 1965. № 36(203). С. 66—93.
11. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе//Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121—150.
12. Федотов С. А. Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для Тихоокеанской фокальной зоны у берегов Курило-Камчатской дуги на 1965—1970 гг. и уточненный прогноз на 1971—1975 гг.//Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 101—109.
13. Федотов С. А., Чернышев С. Д. Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на 1976—1980 гг. и прогноз на 1981—1985 гг.//Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 74—80.
14. Федотов С. А., Чернышев С. Д., Чернышева Г. В., Викулин А. В. Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7,5$, свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги//Вулканология и сейсмология. 1980. № 6. С. 52—67.
15. Федотов С. А., Шумилина Л. С., Чернышева Г. В. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований//Вулканология и сейсмология. 1987. № 6.
16. Широков В. А. Влияние девятнадцатилетнего лунного прилива на возникновение больших извержений и землетрясений и их долгосрочный прогноз//Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975—1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 164—170.
17. Шурьгин А. М., Одиноц М. Г. Долгосрочный статистический прогноз пространственно-временной плотности сильных землетрясений для Курильских островов//Вулканология и сейсмология. 1984. № 6. С. 92—102.
18. Earthquake Prediction. An International Review//Amer. Geophys. Union, Manrice Ewing Series. V. 4. Wash., 1981. 680 p.
19. Fedotov S. A., Sobolev G. A., Boldyrev S. A., Gusev A. A., Kondratenko A. M., Po-

- tapova O. V., Slavina L. B., Pheophylaktov V. D., Khromov A. A., Shirokov V. A.* Long- and short-term earthquake prediction in Kamchatka//Tectonophysics. 1977. V. 37. P. 305—321.
20. *Kelleher J., Sykes L., Oliver J.* Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and Caribbean//J. Geophys. Res. 1973. V. 78. № 14. P. 2547—2585.
21. *Mogi K.* Sequential occurrence of recent great earthquakes//J. Phys. Earth. 1968. V. 16. P. 30—36.
22. *Mogi K.* Earthquake Prediction. Tokyo: Acad. Press Japan, Inc., 1985. 355 p.
23. *Mogi K.* Recent Earthquake Prediction Research in Japan//Science. 1986. V. 233. P. 324—330.
24. Proceedings of Conference VI Metodology for Identifying Seismic Gaps and Soon-to-Break Gaps. California, 1978. 924 p.
25. *Rikitake T.* Earthquake Forecasting and Warning. Tokyo: Cent. Acad. Publ. Japan, 1982. 402 p.
26. *Wyss M., Haberman: R. E.* Seismic quiescence precursory to a past and a future Kurile Island earthquake//Pure and Appl. Geophys. 1979. V. 117. № 6. P. 1195—1221.

Институт вулканологии ДВО АН СССР
Институт физики Земли АН СССР

Поступила в редакцию
3.VIII.1987