

**ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ:
50 ЛЕТ РАЗВИТИЯ МЕТОДА (1965-2015 гг.),
30 ЛЕТ ОБОСНОВАНИЯ МЕР ПО СЕЙСМОУКРЕПЛЕНИЮ
(1985-2015 гг.), ПРОГНОЗ НА СЛЕДУЮЩЕЕ ПЯТИЛЕТИЕ (IV 2015 – III 2020 гг.)**

Федотов С.А.^{1,2}, Соломатин А.В.¹

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, fedotov@kscnet.ru*

² *Институт физики Земли РАН, г. Москва, karetn@list.ru*

Введение

Интенсивность современной сейсмической и вулканической деятельности на Курило-Камчатской дуге достигают наивысшего уровня на Земле. Их всестороннее изучение является одной из главных задач наук о Земле в России. На 2015 год приходится несколько примечательных дат сейсмологических направлений этих исследований.

100-летие инструментальных сейсмологических наблюдений на Камчатке, которые были начаты в г. Петропавловск-Камчатский в июле 1915 г. [2] и др.

80-летие Камчатской вулканологической станции АН СССР - РАН, с сентября 1935 г. ведущей наблюдения за Ключевской группой вулканов, одним из главных вулканических центров мира [3] и др.

50-летие публикации первой статьи об успешном методе долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, основанном на закономерностях сейсмических «брешей» и сейсмического цикла [5, 7]. В течение последующих десятилетий метод был проверен на практике в Курило-Камчатской зоне [4].

40-летие Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг., которое было успешно предсказано по сейсмологическим данным, началось 6 июля 1975 г. и стало одним из шести крупнейших базальтовых извержений нашей эры на Земле. Результаты его всесторонних исследований принадлежат к главным достижениям отечественной вулканологии [1].

30-летие представления предупреждений и предложений о необходимой заблаговременной подготовке Камчатского края к сильным землетрясениям, основанием которых являются данные долгосрочных сейсмических прогнозов для Курило-Камчатской дуги [7 и др.]. Первое из них было послано президенту АН СССР академику А.П. Александрову 23 декабря 1985 г. и было поддержано им [7 (с. 296)]. После этого и дальнейших прогнозов и предупреждений, представлявшихся РАН и государственным учреждениям в 1986-2015 гг., было принято более 15 государственных Постановлений и Решений о выполнении необходимых мер и работ по заблаговременной подготовке к сильным землетрясениям в Камчатском крае [7-10] и др. По оценкам учреждений Правительства Камчатского края, при выполнении этих мер к 2015 г. предотвращен ущерб в размере более 400 млрд. руб.

В данной статье приводятся краткие сведения о развитии исследований и положении дел, приуроченные к этому 30-летию.

Основы метода, прогнозируемые величины и прогноз на IV 2015 – III 2020 гг.

В основе метода долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) С.А. Федотова лежит ряд следующих свойств и закономерностей [5-8 и др.]: сейсмогенная зона Курило-Камчатской дуги является однородной структурой; очаги следующих сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений региона с вероятностью 0.8-0.9 располагаются между очагами предшествовавших таких землетрясений; процесс развития сейсмичности в очагах сильнейших землетрясений региона происходит по сейсмическому циклу с периодом $T_1 = 140 \pm 60$ лет или $T_2 = 120 \pm 50$ лет.

Выделяются следующие стадии такого цикла: I, афтершоковая стадия, характеризующаяся убыванием сейсмичности после сильнейшего землетрясения; II, стабильная стадия, период формирования очага следующего сильнейшего землетрясения; III, форшоковая стадия, возникающая в сейсмических брешах - участках сейсмогенной зоны, в которых сильнейших землетрясений не было более 80 лет, и показывающая наиболее вероятные места следующих таких землетрясений.

Долгосрочные сейсмические прогнозы даются для наиболее активной полосы сейсмогенной зоны Курило-Камчатской островной дуги на глубинах 0-80 км. Эта полоса имеет длину 2100 км и ширину 100 км, и делится в среднем на 20 участков. Для этих участков за предшествующие 5 лет определяется следующая группа параметров:

- сейсмическая активность A_{10} - нормированное число землетрясений класса $K_S = 10$, $M = 3.6$;
- относительная величина сброшенной сейсмической энергии $D(t) = E_2(t)/E_1$, где $E_2(t)$ - текущая нормированная величина сейсмической энергии в пределах конкретного участка, E_1 - аналогичная величина, усредненная по всей сейсмогенной зоне за весь период наблюдений.

Для уточнения прогноза используется также параметр A_{11} , определяемый землетрясениями средней силы ($K_S \sim 11-12$, $M \sim 4-5$) за более продолжительные интервалы времени (10-15 лет) [8-10].

Для указанных участков прогнозируются [7-10 и др.]: стадии сейсмического цикла; вероятные места следующих сильнейших землетрясений - сейсмических брешей; значения сейсмической активности A_{10} ; $M(P \sim 0.8, 0.5, 0.15)$ - магнитуды землетрясений средней силы, ожидающихся с вероятностями: 0.8, 0.5 и 0.15; $M_{\max}$ - максимальные магнитуды ожидаемых землетрясений; $P(M \geq 7.7)$ - вероятности сильнейших землетрясений; относительная опасность сейсмических брешей.

Важнейшими из указанных параметров являются: стадии сейсмического цикла (I, II, III); вероятные места следующих сильнейших землетрясений; вероятности возникновения в них сильнейших землетрясений на следующее пятилетие; относительная опасность сейсмических брешей.

Основы метода, способы расчета и его важные применения приведены в работах [7-10]. Последнее изложение метода, дополнений к нему и прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013 – VIII 2018 гг. приведены в работе [10]. Результаты сопоставляются с данными других методов сейсмического прогноза. Метод может применяться в других регионах со сходными сеймотектоническими условиями, а также использоваться для прогноза опасности больших цунами.

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2015–III 2020 гг.¹

Прогноз на 5-летний период IV 2015 – III 2020 гг. был построен по данным региональных каталогов КФ и СФ ГС РАН (<ftp://ftp.gsras.ru/pub/>) за предыдущее пятилетие: IV 2010 - III 2015 гг. Для анализа сейсмической обстановки на основе землетрясений с $M \geq 5$ использовался также каталог NEIC (<http://earthquake.usgs.gov/>). Результаты прогнозов восьми характеристик сейсмичности приведены в табл. 1 и на рис. 1. Погрешность определения вероятностей землетрясений с $M \geq 7.7$ для сейсмических брешей оценивается величиной 2-3 %. В табл. 1 для сравнения показаны также вероятности землетрясений с $M \geq 7.7$ и относительная опасность сейсмических брешей, которые были получены при предыдущем долгосрочном сейсмическом прогнозе на IX 2014 - VIII 2019 гг.

Основные результаты долгосрочного сейсмического прогноза на IV 2015 - III 2020 гг. заключаются в следующем. Наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ и глубиной очагов $H \leq 80$ км на пятилетний период IV 2015 - III 2020 гг., как и в предыдущем прогнозе на период VIII 2014 - IX 2019 гг., остаются участки, расположенные в районе г. Петропавловск-Камчатский и Южной Камчатки. Для Южной Камчатки (участок 11б, рис. 1) вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 19.3 %; для Авачинского залива (участок 12б, рис. 1) вероятность землетрясения $M \geq 7.7$, имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, – 11.9 %.

Суммарная вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в участках 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б, которые могут иметь силу 7-9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, может достигать 42.4 % в период времени IV 2015 - III 2020 гг. (табл. 1). При этом вероятность возникновения в этот период времени в г. Петропавловск-Камчатский землетрясения силой 9 баллов равняется 11.9 %, а землетрясений силой 8 и 7 баллов – 30.5 %.

В сравнении с предшествующим прогнозом, данным на период IX 2014 - VIII 2019 гг., сейсмическая опасность для г. Петропавловск-Камчатский за период времени IX 2014 - III 2015 г. несколько возросла и остается на очень высоком уровне. Опасность землетрясений силой 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский в этот период в 3-4 раза больше их средней долговременной опасности в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне, которая является наибольшей в сейсмичных областях РФ.

Повышена сейсмическая опасность в сейсмической брешии залива Камчатский (участок 15, рис. 1, табл. 1). Вероятность сильнейшего землетрясения здесь оценивается величиной 9.3 %.

На Курильских островах наиболее высока сейсмическая опасность в районе Средних Курильских о-вов (6, 8 и 9 участки, рис. 1, табл. 1) – общая вероятность сильнейшего землетрясения $M \geq 7.7$ для данного района сохранилась и составляет 31.9 %, при этом, в участках 6 и 8 находятся концы

¹ Был сообщен 14.04.2015 г. губернатору Камчатского края В.И. Илюхину в письме С.А. Федотова «Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на апрель 2015 – март 2020 гг. Наивысшая сейсмическая опасность в районе г. Петропавловск-Камчатский. Необходимость продолжения мер по сейсмоусилению».

главных разрывов Средне-Курильского, Симуширского землетрясения 15.IX 2006 г., $M = 8.2$, [8 и др.], рис. 1. Значение вероятности сильнейшего землетрясения в 8 участке на период IV 2015 – III 2020 гг. является 2-3 по величине - 12.4? %, а в 6 участке - 9.9? %².

Таблица 1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2015 – III 2020 гг. ($H \leq 80$ км), полученный с использованием параметров A_{10} , D , A_{11}

Участок	Δ, км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2010-2015 гг. (IV 2010 г. – III 2015 г.)					Прогноз на IV 2015 – III 2020 гг.							Вероятная очередность						
			Стадия	P ₁ =P(A ₁₀)	P ₂ =P(D)	P ₃ ¹¹ =P(A ₁₁)	B = (P ₁ ·P ₂ ·P ₃)	A ₁₀ (P~0.7)		P~0.8	P~0.5	P~0.15	M _{Max}	P(M≥7.7)%							
								A ₁₀	A ₁₀ ±σ					6.2			(6.8)	7	(7)		
1	0 – 100	Мыс Сириха - п-ов Немуро	III?	0.87	0.73	0.57	0.36	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	6.2	(6.8)	7	(7)				
2	100 – 200	П-ов Немуро - о-в Зелёный	II					1.2	0.8 - 1.9	5.8	6.3	6.8		0.9	(0.9)						
3а	200 – 300	О-в Шикотан, Ю-В	II					1.2	0.8 - 1.9	5.7	6.2	6.7		1.0	(1.0)						
3б	200 – 300	О-в Шикотан, С-З	II					1.2	0.8 - 1.9	5.7	6.2	6.7		0.4	(0.4)						
4	300 – 450	О-в Итуруп	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9		2.1	(2.1)						
5	450 – 600	Пролив Фриза - о-в Уруп	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9		1.9	(1.8)						
6	600 – 750	Мыс Кастрикум - пр. Буассоль	III?	0.94	0.50	0.68	0.32	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.9?	(10.6?)	4-6?	(4?)				
7	750 – 950	О-в Симушир - пр. Крузенштерна	I					2.0	1.3 - 3.0	6.1	6.6	7.1						0.5	(0.5)		
8	950 - 1100	О-в Шикотан	III?	0.54	0.34	0.79	0.15	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	8.0					12.4?	(11.6?)	2-3?	(2-3?)
9	1100 - 1200	О-в Онекотан - пр. 3-й Курильский	III	0.24	0.04	0.53	0.005	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	9.6	(9.9)	4-6	(5-6)				
10	1200 - 1350	О-в Парамушир - мыс Лопатка	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9						2.5	(2.5)		
11а	1350 - 1550	Юг Камчатки, Ю-В	II					0.8	0.6 - 1.1	5.8	6.3	6.8						3.4	(3.3)		
11б	1350 - 1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.57	0.01	0.20	0.002	1.3 – 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	19.3	(19.9)	1	(1)				
12а	1550 - 1700	Зап. Авачинский - п-ов Шипунский, Ю-В	II					1.2	0.8 - 1.9	5.7	6.2	6.7						2.5	(2.5)		
12б	1550 - 1700	Зап. Авачинский - п-ов Шипунский, С-З	III	0.84	0.94	0.23	0.18	1.2 – 3	0.8 - 4.5	5.9	6.4	6.9	8.0					11.9	(12.6)	2-3	(2-3)
13а	1700 - 1850	Залив Кронцкой, Ю-В	III?	0.96	0.98	0.83	0.78	1.2 – 3	0.8 - 4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	3.2	(1.4)	8	(8)				
13б	1700 - 1850	Залив Кронцкой, С-З	II					1.2	0.8 - 1.9	5.9	6.4	6.9						2.1	(2.0)		
14	1850 - 1950	П-ов Кронцкой	II					1.2	0.8 - 1.9	5.8	6.3	6.8						0.4	(0.4)		
15	1950 - 2050	Зап. Камчатский	III	0.50	0.84	0.10	0.04	1.2 - 3	0.8 - 4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	9.3	(9.5)	4-6	(5-6)				
16	2050 - 2100	П-ов Камчатский	II					0.8	0.6 - 1.1	5.7	6.2	6.7		0.5	(0.5)						
Оценка критических значений вероятностей			0.062 0.308 0.354 0.007					Σ = 100.0													

Примечание. Даны прогнозы восьми характеристик сейсмичности Курило-Камчатской на IV 2015 – III 2020 гг. Для всех ее участков указываются вероятные стадии сейсмического цикла. Индексом III отмечены те участки, в которых землетрясения с $M \geq 7.7$ не происходили в течение последних 80 лет и где значительна вероятность прихода заключительной, III стадии сейсмического цикла. Знаками вопроса отмечены те из участков, в которых вероятность такого события меньше. 1-В – параметр, показывающий относительную опасность сейсмических брешей; A_{10} – сейсмическая активность; $P \sim 0.8, 0.5, 0.15$ – вероятности землетрясений с $M = 5.7-7.2$; $M_{\max}$ – максимальная возможная магнитуда; $P(M \geq 7.7)$ – прогнозируемые вероятности сильнейших землетрясений. Выделены оценки вероятности сильнейших землетрясений $P(M \geq 7.7)$ и их очередность. Фигурными скобками показаны наиболее опасные районы – район г. Петропавловск-Камчатский и район Средних Курильских островов. Серым фоном выделены наиболее опасные участки. Значения вероятности $P(M \geq 7.7)$ и вероятной очередности, указанные в скобках, соответствуют их величинам на X 2014 – IX 2019 гг. Средняя долговременная величина $P(M \geq 7.7) = 3.6-4.2\%$.

² Знак вопроса для участков 6 и 8 поставлен потому, что указанный уровень опасности может быть завышен вследствие продолжающегося влияния роя афтершоков близкого Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$, а также вследствие откликов на сильнейшее глубокое землетрясение 14.VIII 2012 г., $M_W = 7.7$.

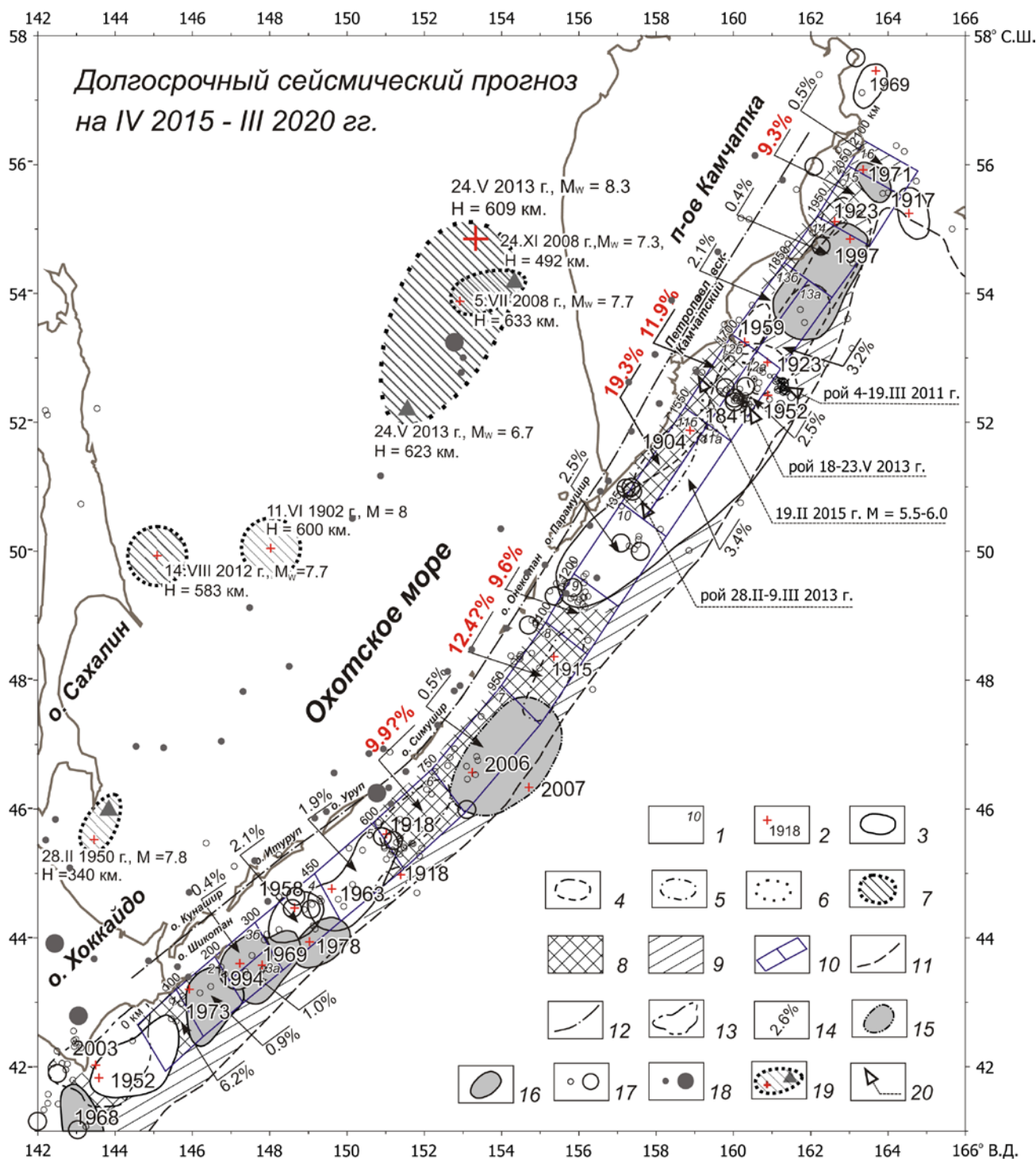


Рис. 1. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов курило-камчатских землетрясений 1902-2015 гг. с $M \geq 7.7$ и вероятностей возникновения неглубоких ($H < 80$ км) таких землетрясений в IV 2015 - III 2020 гг. во всех участках полосы прогноза. **Условные обозначения:** 1 - номера участков; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3 - границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 4 - участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 - вероятные области очагов землетрясений 1904-1918 гг. с $M \geq 7.7$; 6 - предполагаемая область очага 1841 г.; 7 - предполагаемые области очагов глубоких землетрясений 2008 и 2012 гг.; 8 - наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 9 - возможные места следующих таких землетрясений; 10 - границы участков прогноза; 11 - оси глубоководных желобов; 12 - ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 13 - предварительное определение границы очага землетрясения у Хоккайдо 25.IX 2003 г., $M = 8.1$; 14 - вероятности землетрясений $M \geq 7.7$ в X 2014 - IX 2019 гг., табл. 1; 15 - область очага предсказанного землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$; 16 - области очагов других землетрясений с $M \geq 7.7$, которые произошли после 1965 г. в предсказанных сейсмических брешах; 17 - эпицентры неглубоких землетрясений, произошедших в период 1.IV 2010 - 31.III 2015 гг., меньший кружок, соответствует $M = 5.0-5.9$, больший - $M = 6.0-7.4$, $H < 80$ км; 18 - то же с $H \geq 80$ км; 19 - эпицентры и предположительные области очагов глубоких ($H > 300$ км) сильнейших землетрясений, треугольники - положение их главных афтершоков; 20 - наиболее сильные рои землетрясений 2011 - III 2015 гг. в районе Южная Камчатка - Авачинский залив. Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте в течение 5 лет равна 3.6-4.2%.

Участок 1 возле п-ова Немуро является седьмым по степени опасности: $P(M \geq 7.7) = 6.2 \%$.

В остальных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность возникновения сильнейших землетрясений равна средней (3.6-4.2 %) или существенно, до 10-15 раз, ниже ее.

Значение и необходимость продолжения рассмотренных исследований и работ РАН по долгосрочному сейсмическому прогнозу

Долгосрочные сейсмические прогнозы для наиболее сейсмичного региона РФ - Курило-Камчатской дуги, а также предупреждение о необходимости проведения заблаговременных мер по сейсмозащите и сейсмоукреплению в наиболее сейсмически опасном месте - г. Петропавловск-Камчатский, послужили ряда распоряжений Государственного уровня о подготовке Камчатской области к сильным землетрясениям [2, 3 и др.]. В рамках соответствующих целевых Программ для на эти цели Камчатскому краю на 2009-2015 гг. было предусмотрено выделение 12.4 млрд рублей.

Сильнейшее землетрясение в районе г. Петропавловск-Камчатский может быть самым тяжелым стихийным бедствием на Дальнем Востоке России. Стоимость ущерба может превысить 2 трлн рублей, а число погибших составить несколько десятков тысяч. Основной причиной таких потерь является то, что до начала 70-х годов сейсмостойкость строительства здесь была недостаточной. Необходимые меры по предотвращению грозящих ущерба и потерь планируются и принимаются на основании проверенных долгосрочных сейсмических прогнозов РАН. В 1985-2014 гг. была выполнена лишь часть больших необходимых мер. Должны продолжаться и развиваться необходимые меры по сейсмоукреплению и исследования по долгосрочному сейсмическому прогнозу, которые относятся к наиболее важным научно-прикладным работам РАН на Дальнем Востоке России.

В предыдущие годы президент РАН академик Ю.С. Осипов, вице-президент РАН академик Н.П. Лаверов, председатель ДВО РАН академик В.И. Сергиенко, академик-секретарь ОНЗ академик А.О. Глико, губернатор Камчатского края В.И. Илюхин неизменно поддерживали названные исследования и выдвигали необходимые предложения. Далее в сентябре 2014 г. президент РАН академик В.Е. Фортов и вице-президент РАН академик В.И. Сергиенко направили в Правительство РФ письмо о поддержке работ по снижению рисков катастрофических землетрясений.

Рассматриваемые исследования велись по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН, проект ДВО РАН № 12-И-П4-04 «Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: продолжение прогноза, обоснование мер по повышению сейсмостойкости, развитие метода и применение в других регионах мира». Необходимо продолжение такого проекта в 2015 и следующих годах.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975-1976. М.: Наука, 1984. 637 с.
2. Викулин А.В., Синельникова Л.Г. Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке (к 70-летию сейсмостанции «Петропавловск») // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 102-106.
3. Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т. 1. М.: Наука, 1991. 302 с.
4. Соболев Г.А. Методология, результаты и проблемы прогноза землетрясений // Вестник Российской академии наук. 2015. Том 85. № 3. С. 203-208.
5. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды Ин-та физики Земли АН СССР. № 36 (203). М.: Наука, 1965. С. 66-93.
6. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121-150.
7. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 303 с.
8. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2010 - VIII 2015 гг., достоверность предыдущих прогнозов и их применение // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 1-25.
9. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011 – VIII 2016 гг., вероятные время, место и развитие следующего сильнейшего землетрясения Камчатки с $M \geq 7.7$ // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 3-26.
10. Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013 - VIII 2018 гг., особенности сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с $M = 7.7, 7.7$ и 8.3 // Вулканология и сейсмология. 2015. № 2. С. 3-19.