

ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА V 2017 – IV 2022 ГГ., ЕГО РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ; ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБОКОГО ОХОТОМОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 24.V 2013 Г., $M = 8.3$

Федотов С.А.^{1,2}, Соломатин А.В.¹, Кириухин А.В.¹

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

² *Институт физики Земли РАН, г. Москва*

e-mail: karetn@list.ru

Введение

Уровень сейсмичности на Курило-Камчатской дуге являются наивысшим в России. Здесь в среднем раз в 5 лет происходят сильнейшие землетрясения с $M \geq 7.7$. Для мониторинга опасности таких землетрясений в Курило-Камчатском регионе с 1965 г. применяется и развивается метод долгосрочного сейсмического прогноза С.А. Федотова (ДССП). По данным ДССП в настоящее время сохраняется высокий уровень сейсмической опасности в районе г. Петропавловск-Камчатский, где вероятность 9-балльного катастрофического землетрясения в 3 раза больше средней для него. В работе рассматриваются последние результаты исследований по методу ДССП по апробированной методике и дан прогноз для Курило-Камчатской дуги на V 2017 – IV 2022 гг.

Представленные данные ДССП подтверждают необходимость продолжения и увеличения работ по сейсмобезопасности и предотвращению огромных ущерба и потерь в районе г. Петропавловск-Камчатский. Полученные оценки сейсмической опасности для Курило-Камчатской дуги используются, как это делалось с предыдущими прогнозами с 1985 г., для обоснования государственных мер по сейсмозащите и сейсмоукреплению этого форпоста России на Тихом океане.

Основы метода, прогнозируемые величины

В основе метода долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) С.А. Федотова лежит ряд фундаментальных свойств и закономерностей сейсмического процесса, изложенных в работах [Федотов, 1965, 1968, 2005; и др.]: сейсмогенная зона Курило-Камчатской дуги является однородной структурой; процесс развития сейсмичности в очагах сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений региона происходит согласно сейсмическому циклу со средним периодом $T = 120-140$ лет; очаги следующих сильнейших землетрясений региона с вероятностью 0.8-0.9 располагаются между очагами предшествовавших таких землетрясений, в сейсмических брешах.

Долгосрочные сейсмические прогнозы даются для наиболее активной полосы сейсмогенной зоны Курило-Камчатской островной дуги на глубинах 0-80 км. Эта полоса длиной 2100 км и шириной 100 км делится в среднем на 20 участков. На основе ряда параметров сейсмического процесса за предыдущие 5 лет, а также времени предыдущего сильнейшего землетрясения для всех участков прогнозируются: стадии сейсмического цикла; наиболее вероятные места следующих сильнейших землетрясений - сейсмические брешы; значения сейсмической активности A_{10} ; 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. 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. Последнее изложение метода и прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2016 – III 2021 гг. приведены в работе [Федотов, Соломатин, 2017].

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на V 2017 – IV 2022 гг.

(*Был сообщен 5.06.2017 г. губернатору Камчатского края В.И. Илюхину*).

Прогноз на 5-летний период V 2017 – IV 2022 гг. был построен по данным региональных каталогов КФ и СФ ФИЦ ЕГС РАН (<ftp://ftp.gsras.ru/pub/>) за предыдущее пятилетие: VI 2017 – V 2022 гг. Для анализа сейсмической обстановки на основе землетрясений с $M \geq 5$ использовался также каталог NEIC (<http://earthquake.usgs.gov/>). Результаты прогнозов приведены в табл. 1 и на рис. 1. Погрешность определения вероятностей землетрясений с $M \geq 7.7$ для сейсмических брешей оценивается величиной 2-3 %.

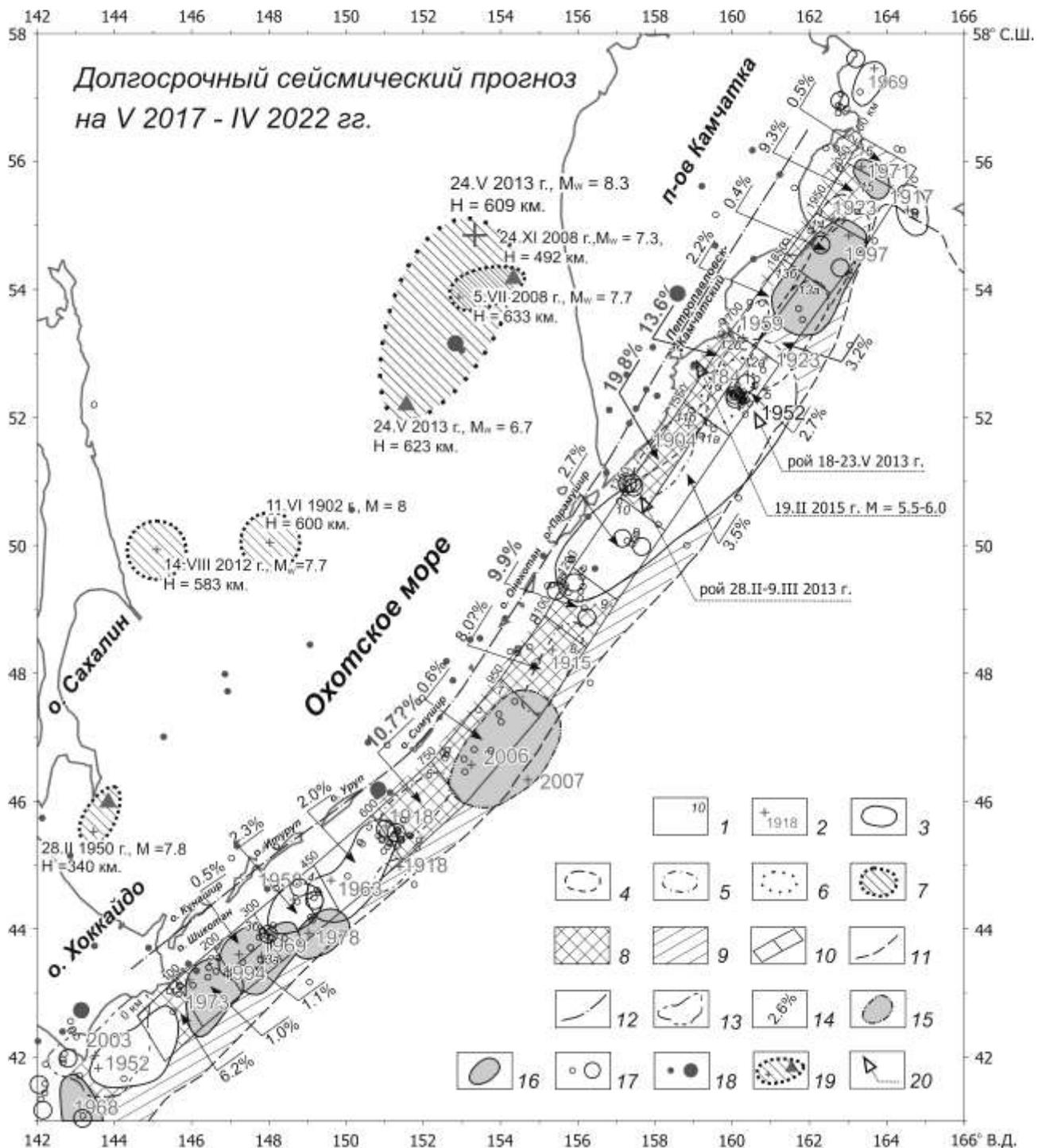


Рис. 1. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов курило-камчатских землетрясений 1902-2017 гг. с $M \geq 7.7$ и вероятностей возникновения неглубоких ($H < 80$ км) таких землетрясений в V 2017 - IV 2022 гг. во всех участках прогноза: 1 - номера участков; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с разной точностью; 3-6 - границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с разной точностью; 7 - предполагаемые области очагов глубоких землетрясений 2008 и 2012 гг.; 8, 9 - наиболее вероятные и возможные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 10 - границы участков прогноза; 11 - оси глубоководных желобов; 12 - ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 13 - границы очага землетрясения у Хоккайдо 25.IX 2003 г., $M = 8.1$; 14 - вероятности землетрясений $M \geq 7.7$ в V 2017 - IV 2022 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 V 2012 - IV 2017 гг., меньший кружок, соответствует $mb = 5.0-5.9$, больший - $mb = 6.0-7.3$, $H < 80$ 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 - рои землетрясений 28.II - 9.III 2013 г., $M_{max} = 6.9$, и 18-23.V 2013 г., $M_{max} = 6.1$, $H < 80$ км. Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте в течение 5 лет равна 3.6-4.2%, к рис. 1.

Таблица 1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на V 2017 – IV 2022 гг. (H ≤ 80 км), построенный по параметрам A₁₀ и D

Участок, №	Δ, км	Район	Год предыдущего землетрясения с M ≥ 7.7	Стадия цикла и ее оценка по данным 2012-2017 гг. (IV 2017 г. – IV 2017 г.)				Прогноз на V 2017 – IV 2022 гг.						Вероятная опасность			
				Стадия	P(A)	P(D)	B = P(A)/P(D)	A ₁₀ (P=0.7)		M							
								A ₁₀	A ₁₀ ± σ	P=0.8	P=0.5	P=0.15	M _{max}		P(M≥7.7)%		
1	0 - 100	Мыс Скриха - п-ов Немуро	1952	III?	0.92	0.73	0.67	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	4.3	(5.6)	7	(6)
2	100 - 200	П-ов Немуро - о-в Зелёный	1973	II				1.2	0.8-1.9	5.8	6.3	6.8		1.0	(0.9)		
3а	200 - 300	О-в Шикотан, Ю-В	1969	II				1.2	0.8-1.9	5.7	6.2	6.7		1.1	(1.1)		
3б	200 - 300	О-в Шикотан, С-З	1994	II				1.2	0.8-1.9	5.7	6.2	6.7		0.5	(0.4)		
4	300 - 450	О-в Итуруп	1958	II				1.2	0.8-1.9	5.9	6.4	6.9		2.3	(2.2)		
5	450 - 600	Пролив Фриза - о-в Уруп	1963	II				1.2	0.8-1.9	5.9	6.4	6.9		2.0	(1.9)		
6	600 - 750	Мыс Кастрикум - пр. Бусоль	1918	III?	0.95	0.49	0.47	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	10.37	(9.67)	47	(4)
7	750 - 950	О-в Симушир - пролив Круzensхтерна	2006	I				1.4	1.0-2.6	6.0	6.5	7.0		0.6	(0.5)		
8	950 - 1100	О-в Шикотан	1915	III?	0.82	0.67	0.55	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	8.77	(9.27)	57	(5)
9	1100 - 1200	О-в Онекотан - пролив 3-й Курильский	1952?	III	0.52	0.03	0.02	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	12.7	(12.5)	2	(2)
10	1200 - 1350	О-в Парамушир - мыс Лопатка	1952	II				1.2	0.8-1.9	5.9	6.4	6.9		2.7	(2.6)		
11а	1350 - 1550	Юг Камчатки, Ю-В	1952	II				0.8	0.6-1.1	5.8	6.3	6.8		3.5	(3.5)		
11б	1350 - 1550	Юг Камчатка, С-З	1904	III	0.61	0.01	0.01	1.3-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	25.7	(25.0)	1	(1)
12а	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шикотан, Ю-В	1952	II				1.2	0.8-1.9	5.7	6.2	6.7		2.7	(2.6)		
12б	1550 - 1700	Зал. Авачинский - п-ов Шикотан, С-З	1841	III	0.51	0.72	0.37	1.2-3	0.8-4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	12.3	(10.8)	3	(3)
13а	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	1923	III?	0.95	0.96	0.92	1.2-3	0.8-4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	1.5	(3.3)	8	(8)
13б	1700 - 1850	Залив Кроноцкий, С-З	1959	II				1.2	0.8-1.9	5.9	6.4	6.9		2.2	(2.1)		
14	1850 - 1950	П-ов Кроноцкий	1997	II				1.2	0.8-1.9	5.8	6.3	6.8		0.4	(0.4)		
15	1950 - 2050	Зал. Камчатский	1923	III	0.64	0.94	0.60	1.2-3	0.8-4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	5.1	(5.1)	6	(7)
16	2050 - 2100	П-ов Камчатский	1971	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	0.019							
											Σ = 100						

Примечание. В табл. даны прогнозы восьми характеристик сейсмичности на V 2017 – IV 2022 гг. Для всех 20 участков дуги указываются вероятные стадии сейсмического цикла. Индексом III отмечены те участки, в которых землетрясения с M ≥ 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; A₁₀ – сейсмическая активность; P – 0.8, 0.5, 0.15 – вероятности землетрясений с M = 5.7-7.2; M_{max} – максимальная возможная магнитуда; P(M ≥ 7.7) – прогнозируемые вероятности сильнейших землетрясений. Значения вероятности P(M ≥ 7.7) в скобках соответствуют их величинам на XI 2016 – X 2021 гг. Средняя долговременная величина P(M ≥ 7.7) = 3.6-4.2%.

Основные результаты долгосрочного сейсмического прогноза на V 2017 – IV 2022 гг. заключаются в следующем. Наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ и глубиной очагов $H \leq 80$ км, как и в предыдущем прогнозе на период IX 2016 - VIII 2022 гг., остаются участки, расположенные в районе г. Петропавловск-Камчатский и Южной Камчатки. Для Южной Камчатки (участок 11б, рис. 1, табл. 1) вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 20.0 %; для Авачинского залива (участок 12б, рис. 1, табл. 1) вероятность землетрясения $M \geq 7.7$, имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, – 13.7 %.

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 45.3 % и более в период времени V 2017 - IV 2022 гг. При этом вероятность возникновения в этот период времени в г. Петропавловск-Камчатский землетрясения силой 9 баллов равняется 13.7 %, а землетрясений силой 8 и 7 баллов – 31.6 %.

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). Вероятность сильнейшего землетрясения здесь оценивается величиной $P(M \geq 7.7) = 9.3$ %.

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 28.1 %, при этом, в участках 6 и 8 находятся концы главных разрывов Средне-Курильского, Симуширского землетрясения 15.IX 2006 г., $M = 8.2$, рис. 1. Значение вероятности сильнейшего землетрясения в 8 участке на период V 2017 – IV 2022 гг. является 2-3 по величине - 12.4? %, а в 6 участке - 9.9? %.

Значения вероятности сильнейшего землетрясения в 6 и 9 участках на период V 2017 – IV 2022 гг. оцениваются величинами 10? % и 10 %, а в 8 участке - 8.1? %¹.

Участок 1 возле п-ова Немуро является седьмым по степени опасности: $P(M \geq 7.7) = 6.3$ %.

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.

Дополнительную значительно меньшую опасность по всей Курило-Камчатской дуге представляют землетрясения, очаги которых располагаются вне выделенной наиболее активной полосы зоны.

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

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 угрозы таких потерь является то, что до начала 70-х годов сейсмостойкость строительства была здесь недостаточной, так как принятая балльность была заниженной. До этого времени она считалась равной 8, и не было каменных строений с большей устойчивостью. Долгосрочные сейсмические прогнозы для наиболее сейсмичного региона РФ, Курило-Камчатской дуги, а также предупреждения о необходимости проведения заблаговременных мер по сейсмозащите и сейсмоукреплению в его наиболее опасном месте, районе г. Петропавловск-Камчатский, в период 1985-2017 гг. послужили основанием многих Правительственных распоряжений и постановлений о подготовке Камчатской области (края) к сильным землетрясениям [Федотов, 2005; Федотов, Соломатин, 2017; и др.]. По данным, приведенным Губернатором Камчатского края В.И. Илюхиным, в это время только в 2009-2015 гг. было проведено сейсмоусиление 45 и построено 35 больших жилых домов. Вместе с тем в Камчатском крае еще остается 1150 объектов жилищного назначения, имеющих дефицит сейсмостойкости, общей площадью 1.86 млн. кв. м. Они составляют 25% площади жилищного фонда края.

Жизненно важным достижением является то, что с начала 70-х годов до нашего времени до 75 % от общей площади жилищного фонда увеличена площадь жилых домов, имеющих

¹ Знак вопроса в табл. 1 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., $M = 7.7$.

необходимую устойчивость. Однако при имеющемся в последние годы объеме работ на повышение устойчивости или замену домов с дефицитом сейсмостойкости, на завершение этих мер могут понадобиться многие дальнейшие десятилетия, и катастрофические потери станут неизбежными. При сохраняющейся чрезвычайно высокой сейсмической опасности в Камчатском крае, особенно в районе г. Петропавловск-Камчатский, 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.

Исследование структурных особенностей сейсмических процессов, предвещающих сильнейшие землетрясения Курило-Камчатского региона и прилегающих областей

Предложен и многие годы применяется ряд дополнений к методу ДССП, [Федотов, 2005], [Федотов, Соломатин, 2017] и др. Среди них начаты оценки влияния текущих особенностей развития сейсмического процесса в регионе на уровень сейсмической опасности.

В рамках этого направления проводятся исследования по выделению ориентированных плоскостей - кластеров гипоцентров землетрясений. Идея выделения плоскоориентированных кластеров сейсмических событий, отражающих развитие трещинных нарушений в вулканических постройках, применялась в [Кирюхин и др., 2016, 2017]. Предполагается, что подобные исследования Курило-Камчатской сейсмогенной зоны приведут к выяснению совместной роли сейсмичности и тектоники в процессе подготовки сильнейших землетрясений региона на примере Кроноцкого землетрясения 5.XII 1997 г., $M = 7.8$, и Жупановского землетрясения 30.I 2016 г., $M = 7.2$ (и последовавшего извержения Жупановского вулкана). Рассматривалось влияние на сейсмичность региона сильных землетрясений прилегающих областей - Северо-Восточной Японии и Командорских островов, - в связи с произошедшими в них сильнейшими землетрясениями 11.III 2011 г., $M = 9$ и 17.VII 2017 г., $M = 7.8$. Продолжалось исследование вопроса об изменениях сейсмической опасности в районе г. Петропавловск-Камчатский, связанных с сильнейшим глубоким Охотоморским землетрясением 24.V 2013 г., $M = 8.3$, [Федотов, Соломатин, 2017].

Предполагается также исследование связи активизаций плоскоориентированных кластеров землетрясений и удаленных форшоков в качестве развития хорошо зарекомендовавшей себя методики краткосрочной оценки сейсмической опасности на основе сценария форшоков, используемого в методе долгосрочного сейсмического прогноза ДССП, [Федотов, 2005].

Рассматриваемые исследования велись по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН, проект ДВО РАН № 15-I-2-035 «Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: продолжение прогноза, обоснование мер по повышению сейсмостойкости, развитие метода и применение в других регионах мира».

Список литературы

1. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008-2012 гг. // «Вулканология и сейсмология». 2016. № 5. С.1-18.
2. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А., Черных Е.В. Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С.3-17.
3. 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.
4. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121-150.
5. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука. 2005. 303 с.
6. Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2016 – III 2021 гг., его развитие и применение; особенности сейсмичности Курило-Камчатской дуги до и после глубокого Охотоморского землетрясения 24.V 2013 г., $M = 8.3$ // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 3-21.