

УДК 557.341

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

© 2015 г. С. А. Федотов^{1,2}, А. В. Соломатин¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: fedotov@kscnet.ru, alf55@mail.ru

²Институт физики Земли РАН
123810 Москва, Б. Грузинская ул., 10,
e-mail: karetn@list.ru

Поступила в редакцию 14.12.2013 г.

В 2008–2014 гг. продолжались работы по долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги методом, основанным на закономерностях размещения очагов сильнейших землетрясений (сейсмические бреши) и сейсмического цикла таких землетрясений, который успешно применяется и развивается в регионе с 1965 г. (метод ДССП). В работе приведен долгосрочный сейсмический прогноз на период IX 2013–VIII 2018 гг. для сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги. Для 20 ее участков предсказываются стадии сейсмического цикла, нормированное число слабых землетрясений A_{10} , магнитуды землетрясений средней силы, ожидаемых с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15, максимальные возможные магнитуды и вероятности возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ в наиболее сейсмически активном интервале глубин 0–80 км. Дополнительно рассмотрены особенности сейсмического процесса исследуемого региона в период 2008–2013 гг. Исследуются особенности размещения роев землетрясений, величины и изменения ряда характеристик сейсмического процесса Курило-Камчатской сейсмогенной зоны в 2008–2013 гг., которые происходили в связи с сильнейшими глубокими землетрясениями под Охотским морем 5.VII 2008 г., $M_W = 7.7$, 14.VIII 2012 г., $M_W = 7.7$, 24.V 2013 г., $M_W = 8.3$, и гигантским землетрясением Тохоку 11.III 2011 г., $M_W = 9.0$. Полученные результаты подтверждают высокую сейсмическую опасность в районе г. Петропавловск-Камчатский и полную необходимость продолжения и увеличения проводимых в нем работ и мер по сейсмоукреплению и сейсмобезопасности.

DOI: 10.7868/S0203030615020029

ВВЕДЕНИЕ ОБ ОСНОВАХ И ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА

Ниже даны краткие сведения об основах используемого метода сейсмического прогноза, прогнозируемых величинах и его применении. Изложение метода приводилось ранее в работах [Федотов, 1965, 1968, 2005; Федотов, Чернышев, 1987; Федотов и др., 1994, 2004, 2007, 2008, 2011, 2012; и др.].

В основе метода долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) С.А. Федотова в его современном виде лежит ряд следующих свойств и закономерностей сейсмичности [Федотов, 2005; и др.]:

- сейсмогенная зона Курило-Камчатской островной дуги является в первом приближении однородной структурой;
- очаги следующих сильнейших землетрясений (с $M \geq 7.7$) сейсмогенной зоны Курило-Камчат-

ской островной дуги с вероятностью 0.8–0.9 располагаются в сейсмических брешах между очагами предшествовавших таких землетрясений;

- процесс развития сейсмичности в очагах сильнейших землетрясений Курило-Камчатской островной дуги и Северо-Восточной Японии происходит по сейсмическому циклу с периодом $T_1 = 140 \pm 60$ лет или $T_2 = 120 \pm 50$ лет.

Выделяются следующие стадии сейсмического цикла таких землетрясений [Федотов, 1965, 1968, 2005; Федотов, Чернышев, 2002; Федотов и др., 1980, 2008]:

- I, афтершоковая стадия (около 15 лет), в которой происходит убывание сейсмичности после сильнейшего землетрясения;
- II, стабильная стадия (около 100 лет), в которой происходит длительное накопление сейсми-

ческой энергии и образование очага следующего сильнейшего землетрясения;

– III, форшоковая, заключительная стадия сейсмического цикла (около 15 лет). Участки сейсмогенной зоны, в которых сильнейших землетрясений не было более 80 лет (сейсмические брешы), являются наиболее вероятными местами таких землетрясений и развития III стадии их цикла.

Многолетние исследования хода сейсмического процесса в очагах сильнейших землетрясений Курило-Камчатской сейсмогенной зоны и ее продолжения в Северо-Восточной Японии показали, что при усреднении сейсмических данных в очагах сильнейших землетрясений (100–200 км и более), проводящимся по временным интервалам порядка их повторяемости в исследуемом регионе (5 лет и более), интенсивность сейсмического процесса в области очага готовящегося сильнейшего землетрясения в среднем возрастает на III стадии [Федотов, 1968, 2005; Федотов и др., 1980, 2008; Родкин, 2008; и др.]. Это свойство учитывается при количественных оценках сейсмической опасности [Федотов, 2005; Федотов и др., 2004, 2012; и др.].

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} [1/год/10³ км²] – нормированное число землетрясений энергетического класса $K_S = 10$, $M = 3.6$;

– относительная величина сброшенной сейсмической энергии $D(t) = E_2(t)/E_1$, где $E_2(t)$ [Дж/год/10³ км²] – текущая нормированная величина сейсмической энергии в пределах конкретного участка, $E_1 = 8.82 \times 10^{13}$ [Дж/год/10³ км²] – аналогичная величина, усредненная по всей Курило-Камчатской сейсмогенной зоне в наиболее активной ее части за весь период наблюдений.

Для уточнения прогноза используется также параметр A_{11} [1/год /10³ км²], аналогичный параметру A_{10} , но определяемый землетрясениями средней силы ($K_S \sim 11–12$, $M \sim 4–5$) за более продолжительные интервалы времени (10–15 лет), [Федотов и др., 2008, 2012].

¹ Энергетические классы землетрясений K_S определяются по шкале, приведенной в работе [Федотов, 1972]. Для определения характеристик E и D используются следующие соотношения между сейсмической энергией, энергетическими классами и магнитудами: $K_S = \lg E(\text{Дж})$; $K_S = 1.5M + 4.6$; $M = M_{\text{ГН}} = M_S = M_W$ [Федотов и др., 2008], [Землетрясения России..., 2009].

Для указанных участков прогнозируются следующие параметры [Федотов, Чернышев, 2002; Федотов и др., 2004, 2007, 2008, 2011, 2012]:

- стадии сейсмического цикла (I, II, III);
- вероятные места следующих сильнейших землетрясений – сейсмических брешей как участков, предположительно проходящих III стадию сейсмического цикла;
- значения сейсмической активности A_{10} ;
- $M(P \sim 0.8, 0.5, 0.15)$ – магнитуды землетрясений средней силы, ожидающихся с вероятностями соответственно: 0.8, 0.5 и 0.15;
- $M_{\text{МАХ}}$ – максимальные магнитуды ожидаемых землетрясений;
- $P(M \geq 7.7)$ – вероятности возникновения сильнейших землетрясений;
- относительная опасность сейсмических брешей.

Основой для определения степени активизации участков, проходящих III, заключительную стадию сейсмического цикла, являются оценки вероятности случайного появления наблюдаемых значений A_{10} и D на II, стабильной стадии сейсмического цикла: $P(A_{10})$, $P(D)$ [Федотов и др., 1980, 2008]. Дополнительно используется параметр A_{11} . Обобщенной вероятностной оценкой служат величины: $V(A_{10}, D) = P(A_{10})P(D)$, $V_1(A_{10}, D, A_{11}) = P(A_{10})P(D)P(A_{11})$ или $V_2(A_{10}, D, A_{11}) = (P(A_{10}) + P(D) + P(A_{11}))/3$. Вероятность возникновения сильнейшего землетрясения с $M \geq 7.7$ в рассматриваемой области пропорциональна величине $(1 - V)$ и длине участка [Федотов, 2005; Федотов и др., 2011, 2012; и др.].

Таким образом успешно выделяются 2–3 наиболее опасные сейсмические брешы Курило-Камчатской дуги [Федотов и др., 2004, 2007, 2008, 2011, 2012].

В целом, прогнозы, составленные для Курило-Камчатской островной дуги по применяемому методу с 1965 г., выполнялись с вероятностью 0.8–0.9 [Федотов, 2005; Федотов, Чернышев, 2002; Федотов и др., 1994, 1998а, 1998б, 2004, 2007, 2008, 2011, 2012].

Пятилетние прогнозы для Курило-Камчатской островной дуги, обновляемые дважды в год, регистрируются в Совете Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН и Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов и передаются в сообщениях этого Совета. Обновления прогноза производятся чаще в случае возникновения сильных землетрясений или при других значительных изменениях сейсмического процесса в изучаемом регионе. В последнем случае для уточнения сейсмической опасности про-

водится комплексная оценка изменений сейсмического процесса.

При рассмотрении результатов, полученных по применяемому методу долгосрочного сейсмического прогноза, проводятся сопоставления с результатами широкого круга других работ. Среди них можно выделить [Кейлис-Борок, Кособоков, 1986; Кособоков, 2005; Nishenko, 1991; Соболев, 1999, 2010; Соболев, Завьялов, 1980] и др. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [Федотов и др., 2011].

Долгосрочные сейсмические прогнозы для наиболее сейсмичного региона Российской Федерации – Курило-Камчатской дуги, основанные на применяемом методе, выделение наиболее опасных мест региона и предупреждение о полной необходимости проведения заблаговременных мер по сейсмозащите и сейсмоукреплению в них, послужили обоснованием шести Распоряжений и Постановлений Совета Министров СССР (1986 и 1989), Совета Министров РСФСР (1987 г.) и Правительства Российской Федерации (1995 и 2001) о подготовке Камчатской области к сильным землетрясениям [Федотов, 2005; и др.].

В 1990–2004 гг. на основании сделанных прогнозов и предупреждений в г. Петропавловске-Камчатском было проведено сейсмоусиление домов, при котором получила защиту 1/10 часть населения города.

В последние годы Правительство РФ утвердило ФЦП “Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2009–2018 годы” (Постановление № 365 от 23.04.2009). Для ее выполнения в Камчатском крае Постановлением Правительства РФ от 30.07.2009 № 615 выделены 8.1 млрд рублей на 2009–2013 гг.

Для продолжения этих работ в 2013 г. Правительство Камчатского края приняло постановление о

долгосрочной целевой программе “Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в Камчатском крае на 2013–2015 годы” (№ 72-П от 25.02.2013). На ее реализацию выделено 4.3 млрд рублей. Ожидаемый предотвращенный ущерб составляет 43 млрд руб.

Данная статья состоит из двух разделов. В первом разделе приведен долгосрочный сейсмический прогноз на IX 2013–VIII 2018 гг. для Курило-Камчатской дуги, построенный по данным на сентябрь 2013 г. Во втором разделе рассмотрены особенности сейсмичности Курило-Камчатского региона в предшествующее пятилетие, 2008–2013 гг., связанные с глубокими охотоморскими землетрясениями 5.VII 2008, 14.VIII 2012 и 24.V 2013 гг. с $M_w = 7.7, 7.7, 8.3$, а также гигантским землетрясением Тохоку 11.III 2011 г., $M_w = 9.0$. Приведены дополнения к прогнозу, которые связаны со свойствами сейсмичности этого предшествовавшего периода. В Заключение и выводах в конце статьи выделяются главные данные представленного долгосрочного сейсмического прогноза и вопросы дальнейшего развития и применения метода.

1. ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА IX 2013–VIII 2018 гг.

(ПО ОЦЕНКАМ НА СЕНТЯБРЬ 2013 г.)²

Прогноз составлен на следующие пять лет, XI 2013–VIII 2018 гг., в обновление предыдущего такого прогноза, составленного на IV 2013–III 2018 гг. Исходные данные взяты из региональных каталогов КФ и СФ ГС РАН (<ftp://ftp.gsras.ru>) за предше-

² Зарегистрирован 28.09.2013 в Совете Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВО РАН) и Камчатского филиала Геофизической службы Российской академии наук (КФ ГС РАН) по прогнозу землетрясений и извержений вулканов.

Рис. 1. Карта долгосрочного сейсмического прогноза на период IX 2013–VIII 2018 гг. для наиболее активной части сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги, очагов сильнейших ($M \geq 7.7$) курило-камчатских землетрясений 1902–2013 гг. и вероятностей возникновения неглубоких ($H < 80$ км) сильнейших землетрясений в IX 2013–VIII 2018 гг. в различных участках этой части сейсмогенной зоны.

1 – номер прогнозного участка; 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. в районе г. Петропавловск-Камчатский; 7 – эпицентры и предположительные области очагов глубоких ($H > 300$ км) сильнейших землетрясений, треугольники – положение их главных афтершоков; 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 – граница очага землетрясения у Хоккайдо 25.IX 2003 г., $M = 8.1$; 14 – прогнозируемые вероятности землетрясений $M \geq 7.7$ в IX 2013–VIII 2018 гг., табл. 3; 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 более слабых землетрясений, произошедших в период 1.I 2008 – 9.IX 2013 гг., представленные с разбиением по интервалам глубин и магнитуд.

Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте сейсмогенной зоны в течение 5 лет равна 3.6–4.2%.

Таблица 1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013–VIII 2018 гг. ($N \leq 80$ км), построенный по параметрам A_{10} и D

Участок, №	Δ , км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2008–2013 гг. (IX 2008–IX 2013)				Прогноз на IX 2013–VIII 2018 гг.						Вероятная очередность			
			Стадия	$P(A)$	$P(D)$	$B = P(A)P(D)$	$A_{10}(P \sim 0.7)$		M							
							A_{10}	$A_{10} \pm \sigma$	$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$	M_{MAX}		$P(M \geq 7.7)\%$		
1	0–100	Мыс Сириха–п-ов Немуро	III	0.62	0.89	0.55	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	5.6	(4.8)	6–7	(7)
2	100–200	П-ов Немуро–о-в Зеленый	II				1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		0.8	(0.8)		
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		2.0	(2.0)		
5	450–600	Пролив Фриза–о-в Уруп	II				1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.7	(1.7)		
6	600–750	Мыс Кастрикум–пр. Буссоль	III?	0.79	0.45	0.36	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	12.0?	(12.7?)	3–4?	(3)
7	750–950	О-в Симушир–пролив Крузенштерна	I				7.5 → 2.6	1.2–2.7	6.2	6.7	7.2		0.5	(0.5)		
8	950–1100	О-в Шиашкотан	III?	0.62	0.23	0.14	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	16.0?	(16.5?)	2?	(2)
9	1100–1200	О-в Онекотан–пролив 3-й Курильский	III	0.33	0.04	0.01	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.4	7.0	7.9	12.3	(11.9)	3–4	(4)
10	1200–1350	О-в Парамушир–мыс Лопатка	II				1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.4	(2.4)		
11а	1350–1550	Юг Камчатки, Ю-В	II				0.8	0.6–1.1	5.8	6.3	6.8		3.2	(3.2)		
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.53	0.01	0.01	1.3–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	24.6	(24.0)	1	(1)
12а	1550–1700	Залив Авачинский–п-ов Шипунский, Ю-В	II				1.2	0.8–1.9	5.7	6.2	6.7		2.4	(2.4)		
12б	1550–1700	Залив Авачинский–п-ов Шипунский, С-З	III	0.70	0.89	0.62	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	7.0	(6.2)	5	(5–6)
13а	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	0.997	0.996	0.99	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	0.1	(0.2)	8	(8)
13б	1700–1850	Залив Кроноцкий, С-З	II				1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.0	(2.0)		
14	1850–1950	П-ов Кроноцкий	II				1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		0.3	(0.3)		
15	1950–2050	Залив Камчатский	III?	0.67	0.86	0.58	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	5.2	(6.4)	6–7	(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	0.019								$\Sigma = 100$		

Примечание. Даны прогнозы восьми характеристик сейсмичности на IX 2013–VIII 2018 гг. Для всех 20 участков дуги 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, I – V – 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. Значения вероятности $P(M \geq 7.7)$ в скобках соответствуют их величинам на IV 2013–III 2018 гг. Средняя долговременная величина $P(M \geq 7.7) = 3.6–4.2\%$.

Таблица 2. Оценки вероятности P_{11} землетрясений с магнитудой $M \geq 7.7$ Курило-Камчатской дуги на IX 2013–VIII 2018 гг. ($H \leq 80$ км), полученные по параметру A_{11} для “сейсмических брешей”

Участок №	Δ , км	Район	P_3^{11} ($M \geq 7.7$), %	Вероятная очередность
1	0–100	Мыс Сириха–п-ов Немуро	10.7 (5.6)	3–4 (6–7)
6	600–750	Мыс Кастрикум–пр. Буссоль	7.0 (12.0?)	6 (3–4?)
8	950–1100	О-в Шиашкотан	5.4 (16.0?)	7 (2?)
9	1100–1200	О-в Онекотан–пролив 3-й Курильский	10.8 (12.3)	3–4 (3–4)
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С-З	18.0 (24.6)	2 (1)
12б	1550–1700	Зал. Авачинский–п-ов Шипунский, С-З	18.9 (7.0)	1 (5)
13а	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	1.7 (0.1)	8 (8)
15	1950–2050	Зал. Камчатский	10.3 (5.2)	5 (6–7)
			$\Sigma = 82.8$ (82.8)	

Примечание. Цифры в скобках – соответствующие оценки $P(M \geq 7.7)$, а также вероятная очередность, определенные по параметрам A_{10} и D , из табл. 1. Средняя долговременная величина $P(M \geq 7.7) = 3.6–4.2\%$. Разница в оценках вероятности P и очередности зависит от того, что параметры A_{10} и D определяются по данным за предыдущие 5 лет, а параметр A_{11} – за предыдущие 15 лет. Значения P_3^{11} ($M \geq 7.7$) могут быть завышены в участках 6 и 8 из-за влияния происшедших в них форшоковых и афтершоковых процессов Средне-Курильского (Симуширского) землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$.

ствующие 5 лет, VIII 2008–IX 2013 гг. При анализе сейсмической обстановки по данным о сильных землетрясениях с $M \geq 5$ использовался также каталог NEIC (<http://earthquake.usgs.gov/>). Результаты приведены на рис. 1 и в трех таблицах, 1–3.

Табл. 1 рассчитана по графикам сейсмического цикла параметров A_{10} (ведущий прогностический параметр) и D . Эти параметры отражают две важнейшие характеристики сейсмического процесса в пределах исследуемого участка: сейсмическую активность A_{10} – нормированное число слабых ($K_S = 10$, $M = 3.6$) землетрясений, и нормированное выделение сейсмической энергии D , определяемое, в основном, самыми сильными произошедшими землетрясениями, Введение, [Федотов, 2005; Федотов и др., 2012] и др.

Табл. 2 построена на основе параметра A_{11} , отражающего нормированное число землетрясений средней силы ($K = 11–12$, $M = 4.3–4.9$), Введение, [Федотов и др., 2008, 2012].

Свойства трех указанных прогностических параметров, а также основные характеристики их сейсмических циклов, уточненные по последним данным, приведены в работах [Федотов и др., 2008, 2012].

В табл. 3 приведены данные о вероятностях землетрясений с $P(M \geq 7.7)$ для сейсмических брешей сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги, рассчитанные по графикам сейсмического цикла параметров A_{10} , D и A_{11} . Данные этой таблицы являются наиболее взвешенными оценками прогнозируемой сейсмической опасности.

Погрешность определения указанных вероятностей $P(M \geq 7.7)$ для сейсмических брешей оце-

нивается величиной 2–3%. В табл. 1 и 3 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 IV 2013–III 2018 гг.

Основные результаты долгосрочного сейсмического прогноза на IX 2013–VIII 2018 гг. по всем 20 участкам, на которые разделена наиболее активная часть сейсмогенной зоны у Курильских островов и Камчатки (см. рис. 1, табл. 3), заключаются в следующем.

Наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ на период IX 2013–VIII 2018 гг. остаются участки, расположенные в районе г. Петропавловск-Камчатский и Южной Камчатки:

- для Южной Камчатки (участок 11б, см. рис. 1) вероятность землетрясения с $M \geq 7.7$, $P(M \geq 7.7)$, имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 19.9%;

- для Авачинского залива (участок 12б, см. рис. 1) вероятность землетрясения $M \geq 7.7$ на IX 2013–VIII 2018 гг., имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 13.3%.

Суммарная вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7.7$, имеющего силу 8–9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, на указанные ближайшие пять лет в двух наиболее опасных участках 11б, 12б, образующих протяженную сейсмическую брешь длиной 350 км, равна 33.2%, см. рис. 1, табл. 3.

Землетрясения, имеющие силу 7–8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, с меньшей вероят-

Таблица 3. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013–VIII 2018 гг. (H ≤ 80 км), полученный с использованием параметров A₁₀, D, A₁₁

Участок	Δ, км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2008–2013 гг. (IX 2008–IX 2013)						Прогноз на IX 2013–VIII 2018 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								
1	0–100	Мыс Сириха–п-ов Немуро	III	0.62	0.89	0.53	0.29	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	7.1	(6.6)	6–7	(7)
2	100–200	П-ов Немуро–о-в Зеленый	II					1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		0.8	(0.8)		
3a	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		2.0	(2.0)		
5	450–600	Пролив Фриза–о-в Уруп	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		1.7	(1.7)		
6	600–750	Мыс Кастрикум–пр. Буссоль	III?	0.79	0.45	0.69	0.25	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	11.3?	(11.5?)	4?	(4?)
7	750–950	О-в Симушир–пр. Круженштерна	I					7.5 → 2.6	1.2–2.7	6.2	6.7	7.2		0.5	(0.5)		
8	950–1100	О-в Шишкотан	III?	0.62	0.23	0.76	0.11	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	13.3?	(13.5?)	2–3?	(2?)
9	1100–1200	О-в Онекотан–пр. 3-й Курильский	III	0.33	0.04	0.53	0.01	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.4	7.0	7.9	9.9	(9.6)	5	(5)
10	1200–1350	О-в Парамушир–мыс Лопатка	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.4	(2.4)		
11a	1350–1550	Юг Камчатки, Ю-В	II					0.8	0.6–1.1	5.8	6.3	6.8		3.2	(3.2)		
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.53	0.01	0.21	0.002	1.3–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	19.9	(19.3)	1	(1)
12a	1550–1700	Залив Авачинский–п-ов Шипунский, Ю-В	II					1.2	0.8–1.9	5.7	6.2	6.7		2.4	(2.4)		
12б	1550–1700	Залив Авачинский–п-ов Шипунский, С-З	III	0.70	0.89	0.17	0.11	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	13.3	(12.9)	2–3	(3)
13a	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	0.997	0.996	0.92	0.92	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	1.2	(1.9)	8	(8)
13б	1700–1850	Залив Кроноцкий, С-З	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.0	(2.0)		
14	1850–1950	П-ов Кроноцкий	II					1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		0.3	(0.3)		
15	1950–2050	Залив Камчатский	III?	0.67	0.86	0.55	0.32	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	6.8	(7.5)	6–7	(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. См. обозначения в табл. 1. Выделены оценки вероятности сильнейших землетрясений P(M ≥ 7.7) и их очередность. Значения вероятности P(M ≥ 7.7) в скобках соответствуют их предыдущим величинам на IV 2013–III 2018 гг. Средняя вероятность возникновения Курило-Камчатских землетрясений с M ≥ 7.7 в одном месте в течение 5 лет равна 3.6–4.2%. Фигурными скобками показаны наиболее опасные районы – район г. Петропавловск-Камчатский и район Средних Курильских островов. Серым фоном выделены наиболее опасные участки.

ностью равной 8.8% могут также произойти в прилегающих участках 11а, 12а, 13а, 13б, см. рис. 1, табл. 3.

Суммарная вероятность возникновения следующего землетрясения с $M \geq 7.7$ в участках 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б, которое может иметь силу 7–9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, таким образом, достигает 42.0% в период времени IX 2013–VIII 2018 гг. (см. рис. 1, табл. 3). При этом вероятность в этот период времени землетрясения силой около 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский равняется 13.3%, а вероятность землетрясения силой 8 и 7 баллов в нем вдвое выше – 28.7%.

По предыдущему прогнозу, данному на IV 2013–III 2018 гг., вероятности землетрясений в г. Петропавловск-Камчатский силой 7–9, 9 и 7–8 баллов были практически такими же и равнялись 41.6, 13.3 и 28.7% соответственно. Таким образом, сейсмическая опасность для г. Петропавловск-Камчатский остается на очень высоком уровне. Опасность землетрясений силой 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский в эти годы в 3–4 раза больше средней долговременной опасности в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне, которая является наибольшей в сейсмичных областях РФ.

Повышена сейсмическая опасность в районе залива Камчатский (участок 15, см. рис. 1, табл. 1–3); вероятность сильнейшего землетрясения в данном районе на следующие 5 лет была оценена величиной 6.8%.

На Курильских островах высока сейсмическая опасность в районе Средних Курильских о-вов (6, 8 и 9 участки, см. рис. 1, табл. 3) – общая вероятность сильнейшего землетрясения для данного района составляет 34.5%. В участках 6 и 8 находятся концы главных разрывов Средне-Курильского, Симуширского землетрясения 15.IX 2006 г., $M = 8.2$, см. рис. 1. Наибольшая активность наблюдается на 6 и 8 участках. Значение вероятности сильнейшего землетрясения в 8 участке на период IX 2013–VIII 2018 гг. является вторым–третьим по величине на Курило-Камчатской дуге и оценивается величиной 13.3%, а в 6 участке величиной 11.3%. Знак вопроса для участков 6 и 8 поставлен потому, что уровень сейсмичности здесь может быть завышен под влиянием продолжавшегося роя афтершоков близкого Средне-Курильского, Симуширского землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$, а также вследствие откликов на сильнейшее глубокое землетрясение 14.VIII 2012 г., $M_w = 7.7$, произошедшее у восточного побережья о. Сахалин, см. рис. 1. Подобная взаимосвязь с глубокими землетрясениями рассматривалась в [Mogi, 1985; и др.]. Для компенсации влияния афтершоковых процессов Симуширского землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$, расчеты сейсмических параметров в участках 6 и 8 проводились по более

краткому интервалу времени 4 года, начиная с VIII 2009 г.

Участок 1 возле п-ова Немуро (см. рис. 1, табл. 3) является шестым–седьмым по степени опасности, в период IX 2013–VIII 2018 гг., $P (M \geq 7.7) = 7.1\%$.

Средняя пятилетняя величина $P (M \geq 7.7)$ в сейсмических брешах равна 11.7%.

В остальных 13 участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность возникновения сильнейших землетрясений $P (M \geq 7.7)$ меньше в 8.1 раз. Она меняется от 0.3 до 3.2%, в среднем равна 1.4% и существенно ниже средней пятилетней вероятности для дуги, которая равна 3.6–4.2%.

Камчатский сегмент сейсмогенной зоны в целом, и особенно районы Южной Камчатки и Авачинского залива, по-прежнему остается наиболее сейсмически опасной частью всей Курило-Камчатской дуги.

Важно отметить, что в соответствии с данными [Федотов и др., 2011] к настоящему времени в пределах Камчатского сегмента сейсмогенной зоны может быть накоплена сейсмическая энергия, равная энергии землетрясения с $M = 8.5$, максимальной магнитудой, наблюдавшейся в Курило-Камчатском регионе.

2. ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧНОСТИ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА В 2008–VIII 2013 гг.

Долгосрочный сейсмический прогноз, приведенный в разделе 1, строился с использованием усредненных за предыдущее пятилетие (IX 2008–IX 2013 гг.) оценок параметров сейсмического процесса в рассматриваемых участках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны. Для уточнения оценок текущей сейсмической опасности в регионе необходимо дополнительное рассмотрение особенностей развития сейсмичности зоны в этот период.

В предыдущем пятилетии, 2008–2013 гг., сейсмичность Курило-Камчатского региона, а также прилегающего к нему района Северо-Восточной Японии, характеризовалось рядом значительных особенностей. Наиболее яркой из них является уникальная серия трех глубоких ($H \sim 600$ км) землетрясений под Охотским морем: 5.VII 2008 г., $M_w = 7.7$, 14.VIII 2012 г., $M_w = 7.7$ и Охотоморское землетрясение 24.V 2013 г., $M_w = 8.3$ (табл. 4, рис. 1, 2). Ранее за весь период инструментальных наблюдений в регионе было только два таких землетрясения: 11.VI 1902 г., $M = 8$, $H = 600$ км и 28.II 1950 г., $M = 7.8$, $H = 340$ км.

Еще одним важнейшим событием этого периода явилось гигантское катастрофическое землетрясение у о. Хонсю, Северо-Восточная Япония,

Таблица 4. Землетрясения энергетического класса $K_S \geq 14.0$ ($M_W \geq 6$) и наиболее сильные рои землетрясений Курило-Камчатского региона в 2008–2013 гг.

№ п.п.	Времена сильных землетрясений или интервалов главных событий роев*	Координаты сильных землетрясений или главных событий роев			Временные интервалы роев**	Энергетические классы K_S (магнитуды M_W) сильных землетрясений или главных событий роев
		°с.ш.	°в.д.	Н, км		
1	3.III 2008	45.9	154.0	94	26.II–8.III 2008	14.0 (6.5)
2	5.VII 2008	53.9	152.9	633		(7.7)
3	6.VII 2008	45.1	151.4	37	6–16.VII 2008	14.5 (5.7)
4	24.VII 2008	50.8	158.3	36		14.0 (6.2)
5	24.XI 2008***	54.2	154.3	492		15.4 (7.3)
6	28.XII 2008–15.I 2009	46.8	155.4	41	28.XII 2008–22.I 2009	15.5 (7.4)
7	7–18.IV 2009	45.8	152.0	68	7–24.IV 2009	14.8 (6.9)
8	30.VII 2010	52.2	160.5	38	30–31.VII 2010	14.1 (6.3)
9	9.1 20.II 2011	55.7	162.5	48	20.II–14.III 2011	13.8 (6.1)
	9.2 3.III 2011	46.9	151.3	154		13.1 (5.4)
	9.3 4–9.III 2011	52.5	161.3	48	28.II–27.III 2011	12.3 (5.2)
10****	11.III 2011	38.3	142.4	29		(9.0)
11	4.VIII 2011	48.6	155.4	51		14.1 (6.1)
12	21.X 2011	44.0	142.7	175		14.4 (6.2)
13	14.IV 2012	49.2	155.9	90	14–24.IV 2012	14.5 (5.6)
14	4.V 2012	43.3	145.6	92		14.5 (4.6)
15	8–14.VII 2012	45.2	151.7	43	4–17.VII 2012	14.0 (6.0)
16	20.VII 2012	49.2	155.9	43	7–21.VII 2012	14.3 (6.0)
17	14.VIII 2012	49.8	145.1	583		(7.7)
18	16.X 2012	49.5	156.8	87		14.0 (5.6)
19	16.XI 2012	49.2	155.9	72	1–16.XI 2012	14.8 (6.5)
20	2.II 2013	42.6	143.3	107	1–2.II 2013	15.6 (6.9)
21	28.II–4.III 2013	50.7	157.9	47	28.II–9.III 2013	15.3 (6.9)
22	24.III 2013	50.7	160.4	42	24–25.III 2013	14.0 (5.9)
23	19–20.IV 2013	49.8	157.8	47	13–21.IV 2013	14.2 (6.1)
24	19.IV 2013	45.8	151.3	118	19–21.IV 2013	16.3 (7.2)
25	19–21.V 2013	52.1	160.5	48	18–23.V 2013	14.4 (6.0)
26	24.V 2013	54.9	153.3	609		(8.3)
27	24.V 2013***	52.2	151.5	623		15.0 ($M_t = 6.4$)

Примечание. * Главным событием роя считается наибольшее по энергетическому классу землетрясение роя или первое из группы нескольких равных наибольших землетрясений; ** указаны только для роев землетрясений; *** сильнейшие афтершоки; **** сильнейшее удаленное землетрясение Тохоку 11.III 2011 г., $M_W = 9.0$ ($M = 8.9$) у берегов Северо-Восточной Японии. Жирным шрифтом выделены сильнейшие ($M \geq 7.7$) землетрясения. Положение эпицентров указано на карте региона (рис. 1, 2) и на временной развертке (рис. 3).

с.ш.

58°

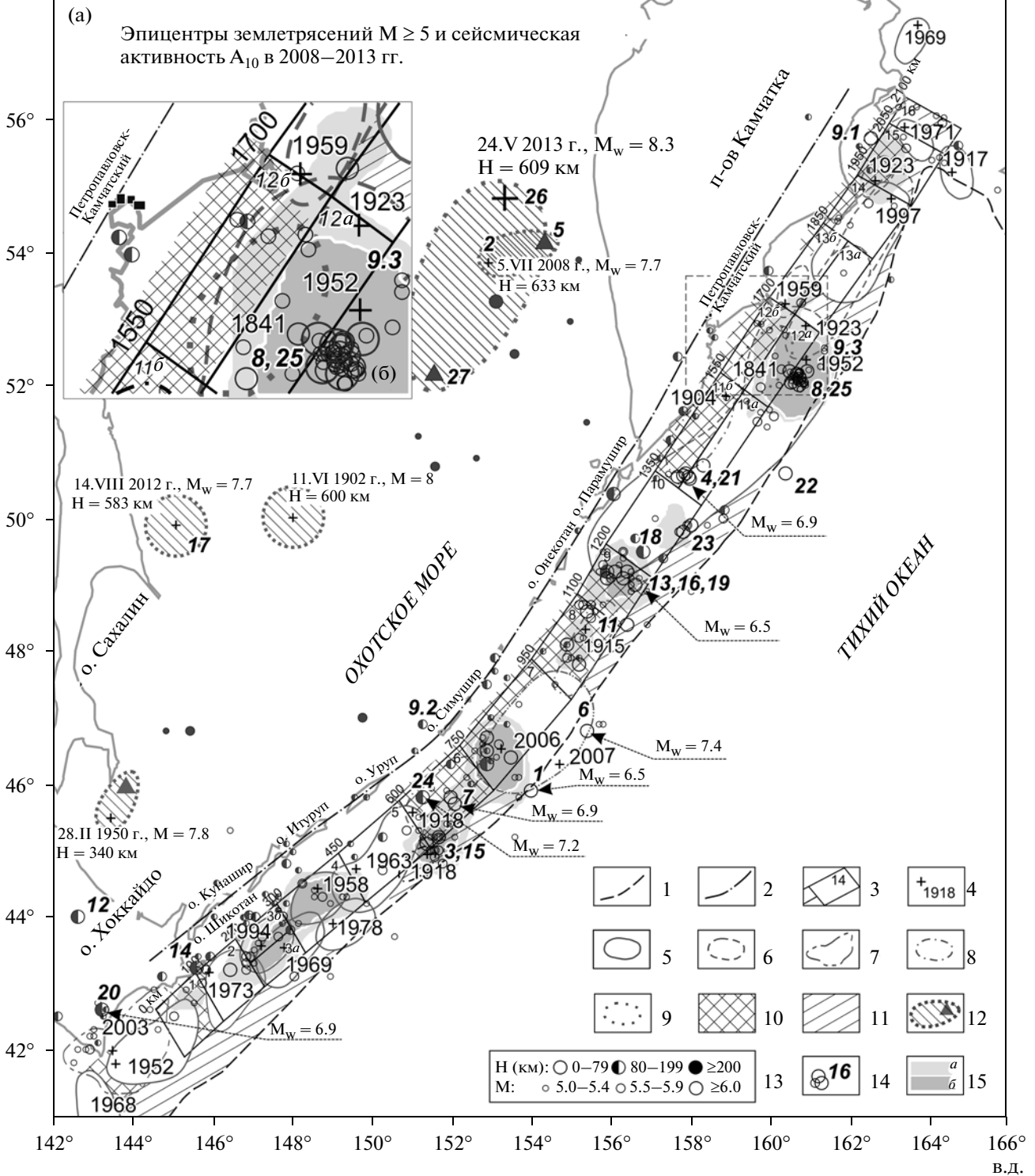


Рис. 2. Карта Курило-Камчатской сейсмогенной зоны с указанием положения участков прогноза, очагов сильнейших ($M \geq 7.7$) курило-камчатских землетрясений 1841–2013 гг., эпицентров более слабых землетрясений ($M \geq 5$) 2008–IX 2013 гг. и их роев, а также сейсмической активности A_{10} этих последних лет на глубинах 0–80 км.

(а): 1 – оси глубоководных желобов; 2 – ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 3 – границы участков прогноза и их номера; 4 – инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 5 – границы очагов неглубоких ($H < 80$ км) землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 6 – участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 7 – граница очага землетрясения у о. Хоккайдо 25.IX 2003 г., $M_w = 8.3$; 8 – вероятные области очагов неглубоких землетрясений 1904–1918 гг. с $M \geq 7.7$; 9 – предполагаемая область очага 1841 г.; 10 – наиболее вероятные места следующих неглубоких землетрясений с $M \geq 7.7$; 11 – возможные места следующих таких землетрясений; 12 – предполагаемые границы областей очагов глубоких землетрясений с $M \geq 7.7$, происходивших в 1902, 1950, 2008, 2012 и 2013 гг., и положение их главных афтершоков; 13 – эпицентры более слабых ($M \geq 5$) землетрясений, произошедших в период 1.I 2008–9.IX 2013 гг., представленные с разбиением по интервалам глубин и магнитуд; 14 – номера наиболее сильных землетрясений и роев этого периода, табл. 4; 15 – уровни параметра A_{10} : а, $A_{10} \geq \bar{A}_{10} = 1.15$;

б, $A_{10} \geq \bar{A}_{10} + \sigma = 1.74$ в кругах радиуса $R = 50$ км на глубинах 0–80 км.

(б): увеличенный фрагмент карты (а), обозначения те же.

которое произошло 11.III 2011 г. и имело магнитуду $M_w = 9$. Очаг этого землетрясения заполнил гигантскую сейсмическую брешь, ранее выделенную в этом районе [Федотов и др., 2012].

Эти крупнейшие события оказали влияние на развитие сейсмического процесса пятилетия 2008–2013 гг. в наиболее активной части сейсмо-

генной зоны Курило-Камчатской дуги – полосе прогноза и области ее неглубоких сильнейших землетрясений.

При описании особенностей сейсмического процесса в данном разделе рассматривается одна из его показательных характеристик – роевая сейсмическая активность. К ней отнесены как

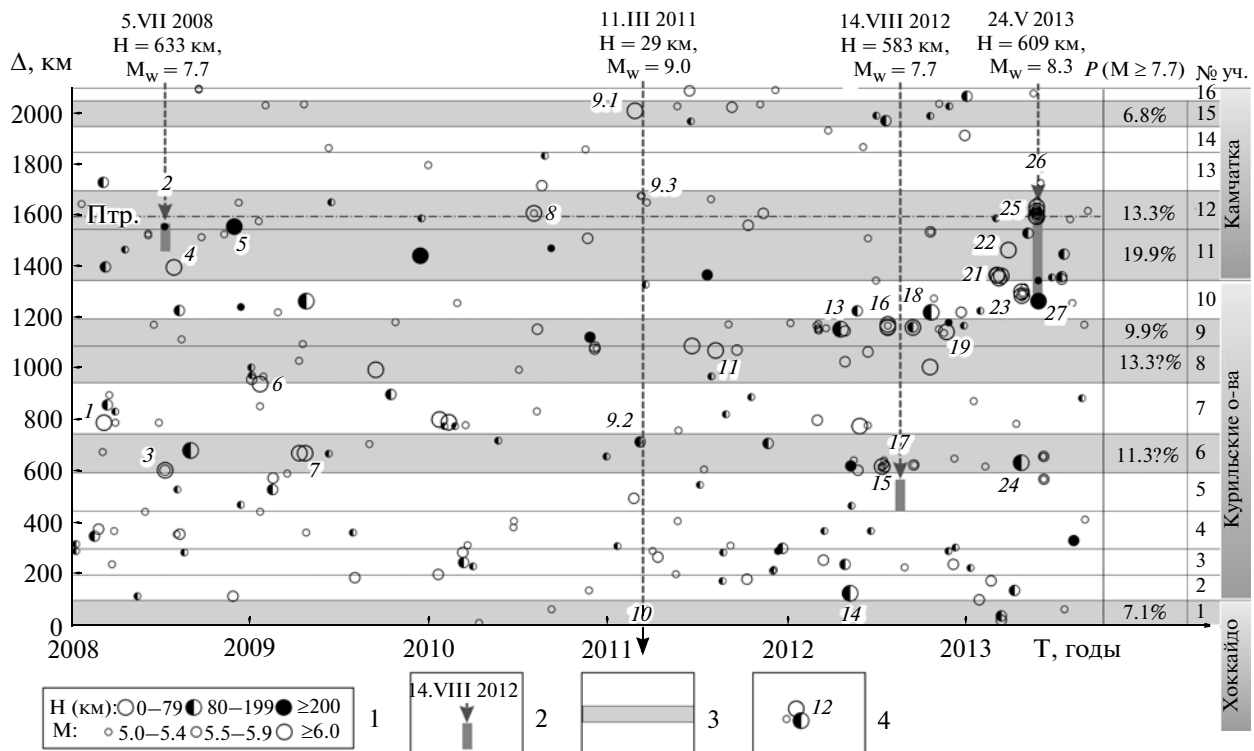


Рис. 3. Пространственно-временная развертка сейсмического процесса вдоль Курило-Камчатской дуги в 2008–XI 2013 гг. Расстояние Δ км соответствует проекции эпицентров землетрясений на центральную осевую линию вдоль наиболее активной части сейсмогенной зоны дуги, участки 1–16 на рис. 1, 2 и в табл. 1, 3.

1 – пространственно-временная проекция эпицентров землетрясений $M = 5.0–7.3$, произошедших в период 1.I 2008–9.IX 2013 гг., с разделением по интервалам глубин и магнитуд (рис. 1, 2); 2 – проекции областей очагов сильнейших глубоких охотоморских землетрясений 2008, 2012, 2013 гг., а также дата сильнейшего удаленного землетрясения Тох-оку (2011 г., табл. 4); 3 – сегменты проекции, соответствующие сейсмическим брешам в участках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны (рис. 1, 2; табл. 1, 3); 4 – номера названных землетрясений и их роев, соответствующие табл. 4.

рой однотипных землетрясений, так и сейсмические активизации в виде форшок-афтершоковых последовательностей, привязанные к главным событиям.

Подобные сейсмические активизации, компактные во времени и в пространстве группы землетрясений, происходят при образовании новых разрывов и при повторных подвижках по существующим разрывам. Оба явления присущи II и III стадиям подготовки макроразрыва, наблюдавшимся в лабораторных экспериментах [Соболев, Пономарев, 2003; и др.], — стадиям укрупнения трещин и их стягивания к плоскости будущего магистрального разрыва.

В соответствии с этими представлениями в настоящей работе предполагается, что сейсмические рои указывают либо на области повышенной концентрации напряжений, либо на области, ослабленные существующими в данный момент разломами. В обоих случаях они указывают на вероятные места следующих сильных землетрясений.

Кластеризация землетрясений в качестве одного из параметров, применяемых для описания сейсмического процесса в изучаемом регионе, рассматривается в работах [Соболев, Пономарев, 2003; Салтыков и др., 2013]. Изучению роевой активности Камчатского участка сейсмогенной зоны в период 1962–2008 гг. посвящена работа [Славина и др., 2009]. При рассмотрении особенностей сейсмичности изучаемого региона в настоящей работе учитывались также сведения о его геодинамике и сейсмотектонике [Селиверстов, 2009; Рогожин, 2013; и др.].

Другой стороной рассматриваемой задачи является связь сейсмичности в глубоких и верхних областях сейсмогенной зоны. Подобная связь изучалась в работах [Захарова, Рогожин, 2005; Юнга и др., 2011]. По данным [Mogi, 1985] существует зависимость между глубокими и сильнейшими неглубокими землетрясениями.

Для анализа роевой сейсмичности использовались сейсмологические данные для изучаемого региона за период I 2008–V 2013 гг. на основе тех же региональных каталогов, что и в разделе 1. В настоящем разделе учитывались данные, отражающие основные характеристики наиболее сильных землетрясений с $M \geq 6.0$ и роев землетрясений с главными событиями энергетического класса $K_S \geq 14.0$ ($M_W \geq 5.6$), см. табл. 4. В качестве графического материала для анализа использовалась карта представленных в табл. 4 эпицентров землетрясений и роев, дополненная изолиниями сейсмической активности A_{10} , см. рис. 2. Показана также пространственно-временная развертка рассматриваемой сейсмичности, рис. 3. На рис. 2

и 3 указаны номера землетрясений и роев, приведенных в табл. 4.

При определении временных границ сейсмических активизаций (см. табл. 4) использовалась выборка землетрясений $K_S \geq 10.5$ региональных каталогов КФ и СФ ГС РАН.

Пространственно-временные границы сейсмических роев определялись при рассмотрении пространственных областей радиусом 50–100 км вокруг эпицентров главных событий роевых активизаций, см. табл. 4. Для этих областей строился временной график суммарного количества землетрясений класса $K_S \geq 10.5$. При превышении сейсмичности по отношению к фоновой в 2 и более раз пространственно-временная область отмечалась в качестве активизированной. За начало активизации принималось первое в последовательности землетрясение энергетического класса $K_S = 11–12$. Последнее такое землетрясение (в отдельных случаях и более слабое), отстоящее от предыдущего не более чем на несколько суток, принималось за ее окончание. Приведенное построение и выделенные временные интервалы роев условны. Основная информация о времени активизации дается временем ее главного события.

Вначале кратко рассмотрим влияние четырех названных выше сильнейших землетрясений 2008, 2011, 2012 и 2013 гг. на сейсмичность и рои землетрясений Курило-Камчатской дуги в период I 2008–IX 2013 гг.

Глубокое землетрясение под Охотским морем 5.VII 2008 г., $M_W = 7.7$, $H = 633$ км, № 2, было первым из них, см. табл. 4, рис. 2 и 3. Оно произошло к северо-западу от наиболее опасных участков полосы прогноза 11 и 12. За ним 6–16.VII и 24.VII 2008 г. последовали рои землетрясений № 3 и землетрясение № 4 в сейсмических брешах участков 6 и 11б, а также началось извержение вулкана Корякский вблизи г. Петропавловск-Камчатский.

Гигантское землетрясение Тохоку, 11.III 2011 г., $M_W = 9.0$, № 10, произошло в Северо-Восточной Японии южнее Курило-Камчатской дуги. Оно оказало влияние на ход сейсмических процессов в прилегающих и удаленных регионах. Показательно, что один из предшествовавших роев — № 9.3, который возник на Камчатке 28.II 2011 г., имел максимум 4–9.III 2011 г. и происходил в наиболее опасном участке 12 в Авачинском заливе, см. табл. 4, рис. 1–3. Ниже приводятся краткие сведения о наблюдавшихся сопутствующих сейсмических явлениях.

Полоса прогноза Курило-Камчатской дуги, см. рис. 2, находится на расстоянии 500–2500 км к северо-востоку от эпицентра главного толчка землетрясения Тохоку. В период времени

30.IX 2010–1.IX 2011 гг., до и после землетрясения 11.III 2011 г. в Тохоку, на Курило-Камчатской дуге наблюдалось 8 землетрясений с $M_w \geq 5.5$, см. табл. 4, рис. 3. Два из них, в том числе первое и наиболее сильное № 8 с $M_w = 6.3$, произошли в течение 6 месяцев до землетрясения Тохоку, а 6 таких землетрясений, № 11 и др., – в течение 6 месяцев после него, см. рис. 1–3. При этом наблюдались примечательные особенности [Федотов и др., 2012]:

- одно из предшествующих событий – сильное землетрясение с $M_w = 6.1$, № 9.1, произошло 20.II 2011 г. за три недели до землетрясения Тохоку напротив опасной брешы в Камчатском заливе, участок 15, см. рис. 1–3;

- второе такое землетрясение с $M_w = 5.4$, № 9.2, произошло за неделю до него – 3.III 2011 г. на глубине 150–180 км под вулканическим поясом напротив южной оконечности очага Средне-Курильского (Симуширского) землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$, около сейсмической брешы в участке 6, см. рис. 1–3;

- наиболее примечательным событием был рой землетрясений № 9.3 с $M_w \leq 5.2$, который наблюдался 4–19.III 2011 г., в течение недели до и недели после землетрясения Тохоку 11.III 2011 г., см. табл. 4, рис. 2 и 3; этот рой был продолжен в том же месте землетрясением 20.III 2011 г. с $M_w = 5.7$, затем 26.VII 2011 г. последовало близкое к нему землетрясение с $M_w = 5.6$ в наиболее опасном месте – Авачинском заливе, участок 12б [Федотов и др., 2012];

- в опасной сейсмической брешы у о-ва Онекотан, Курильские о-ва, участок 8 на рис. 1–3, до и после землетрясения Тохоку в период XI 2010–VIII 2011 гг. происходили землетрясения с $M = 5.5–6.1$ и главным событием – землетрясением 4.VIII 2011 г., $M_w = 6.1$, № 11, см. табл. 4.

Таким образом, в течение полугода до и после землетрясения Тохоку наблюдались отклики на него в местах полосы прогноза, опасных по долгосрочному сейсмическому прогнозу, раздел 1: в Авачинском заливе, рой № 9.3, в Камчатском заливе, № 9.1, и в районе о-ва Онекотан, № 11, – участки 12, 15 и 8 на рис. 1–3 соответственно.

14.VIII 2012 г. под Охотским морем произошло новое глубокое землетрясение с $M_w = 7.7$, № 17, $H = 583$ км, очаг которого находился к северо-западу от Средних Курильских островов, см. табл. 4, рис. 1–3. Показательно, в течение нескольких месяцев до сильнейшего глубокого землетрясения 14.VIII 2012 г. на глубинах 0–80 км под брешами Средних Курильских островов, участки 6, 8 и 9, происходили землетрясения № 13, 15, 16 с $M_w =$

$= 5.6–6.0$. После него в X–XI 2012 г. наблюдались отклики в участках 9 и 10, № 18 и № 19, $M_w = 6.5$, см. табл. 4, рис. 2 и 3.

Глубокое Охотоморское землетрясение 24.V 2013 г., $M_w = 8.3$, № 26, было сильнейшим землетрясением у берегов Камчатки в 1961–2013 гг. [Чебров и др., 2013а, 2013б]. Оно ощущалось даже в Москве.

Перед ним 28.II–9.III 2013 г. у мыса Лопатка на юге Камчатки наблюдался сильный рой неглубоких землетрясений с M_w до 6.9, № 21, см. табл. 4, рис. 2 и 3, подробное описание этого роя дано в [Чебров и др., 2013а]. Наиболее сильное землетрясение этого роя с $M_w = 6.9$ произошло 28.II 2013 г. в участке 11б у мыса Лопатка на южной оконечности Камчатки, № 21, см. рис. 2 и 3. Эпицентр землетрясения находился на расстоянии 270 км от Петропавловска-Камчатского, в котором оно имело силу 3–4 балла. По долгосрочному сейсмическому прогнозу этот участок является опасной сейсмической брешью [Федотов и др., 2012; и др.].

По сценарию форшоков землетрясений с $M \geq 7.7$ [Федотов, 2005; и др.], вероятность таких землетрясений резко возрастает в сейсмических брешах Курило-Камчатской дуги после землетрясений с $M \geq 6$ в них. После землетрясения 28.II 2013 г. с $M_w = 6.9$ был дан прогноз повышения опасности землетрясений с $M \geq 7.7$ в сейсмических брешах участков 11б и 12б и районе г. Петропавловска-Камчатского на начало марта 2013 г.

После роя № 21 вблизи него в участках 10–12 24–25.III и 13–21.IV 2013 г. произошли новые рои неглубоких землетрясений № 22 и 23, $M_w = 5.9–6.1$. Затем 18–23.V 2013 г., накануне Охотоморского землетрясения 24.V 2013 г. произошло наиболее показательное событие – новый рой землетрясений № 25 на глубине 48 км в самой активной части Авачинского залива, см. табл. 4, рис. 2 и 3 [Чебров и др., 2013а].

Через день после роя № 25, 24.V 2013 г. в нижней части того же сегмента сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской дуги произошло глубокое Охотоморское землетрясение с $M_w = 8.3$, № 26, и афтершок с $M_1 = 6.4$ в южной части его очага, № 27 (см. рис. 2 и 3).

Более полное рассмотрение особенностей сейсмичности, предшествующих роев и взаимосвязи землетрясений Курило-Камчатского региона в 2008–2013 гг. может быть представлено в других работах.

На основании данных, приведенных в настоящем разделе, можно сделать ряд замечаний и дополнений к долгосрочному сейсмическому прогнозу на IX 2013–VIII 2018 гг., раздел 1.

Повышение уровня сейсмичности в брешах

Долгосрочные сейсмические прогнозы (ДССП) для Курило-Камчатской дуги составляются на следующие пять лет для наиболее активной полосы сейсмогенной зоны дуги с глубинами очагов землетрясений 0–80 км. Наибольшие величины вероятности сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ на следующие 5 лет получаются для тех сейсмических брешей, в которых среднее значение сейсмических параметров и уровень сейсмичности были повышенными в течение предыдущих 5 лет, Введение, раздел 1. Карты эпицентров землетрясений и изолиний сейсмической активности A_{10} ³ на глубинах 0–80 км и развертка сейсмичности вдоль дуги во времени в 2008–2013 гг., см. рис. 1, 2 и 3, показывают, каким образом происходило развитие сейсмичности дуги в эти годы. Они подтверждают значительное повышение среднего уровня сейсмичности в сейсмических брешах в предшествующие 5 лет и обоснованность прогнозов, данных для них на IX 2013–VIII 2018 гг.⁴

Начало разрыва в Авачинском заливе

Землетрясение Тохоку, 11.III 2011 г., $M_W = 9.0$, и глубокое Охотоморское землетрясение 24.V 2013 г., $M_W = 8.3$, были сильнейшими землетрясениями 2008–2013 гг. в северо-западной части Тихоокеанского сейсмического пояса, которые оказывали явное воздействие на сейсмогенную зону всей Курило-Камчатской дуги.

4.III 2011 г., за 7 дней до землетрясения Тохоку, у Авачинского залива на Камчатке началась наиболее активная фаза роя землетрясений $M_W \leq 5.2$, № 9.3, см. табл. 4, рис. 2 и 3.

Аналогичная активизация в этом районе наблюдалась за несколько дней перед Охотоморским землетрясением 24.V 2013 г.: 18–23.V 2013 г. здесь наблюдалась сейсмическая активизация с $M_W \leq 6.0$, рой № 25, см. табл. 4, рис. 2 и 3.

Показательно, что рои № 9.3 и № 25 произошли в одном и том же месте – около очень опасной

сейсмической брешы в Авачинском заливе, находящейся вблизи г. Петропавловск-Камчатский, участок 12б, см. рис. 1 и 2. Такое совпадение повышает вероятность того, что следующее сильнейшее землетрясение с $M \geq 7.7$ Курило-Камчатской дуги произойдет в Авачинском заливе.

Независимые оценки вероятных места, времени и развития следующего землетрясения на Камчатке с $M \geq 7.7$ были получены ранее при рассмотрении однотипного развития последовательностей форшоков, главных толчков и афтершоков трех последних неглубоких сильнейших землетрясений Камчатки: 22.XI 1969 г., 15.XII 1971 г. и 5.XII 1997 г. [Федотов и др., 2012]. В этой работе тоже было показано, что наиболее вероятным местом следующего сильнейшего землетрясения на Камчатке на глубинах 0–80 км является сейсмическая брешь в Авачинском заливе в районе г. Петропавловск-Камчатский.

Вероятное положение очага $M \geq 8.3$ у Южной Камчатки

Примечательны свойства событий № 4 и 21, которые происходили в одном месте у мыса Лопатка, южная оконечность Камчатки, см. табл. 4, рис. 2 и 3.

Землетрясение № 4, 24.VII 2008 г., $H = 36$ км, $M_W = 6.2$, возникло через 20 дней после глубокого сильнейшего землетрясения 5.VII 2008 г., $M_W = 7.7$. Рой № 21, $M_W \leq 6.9$, $H = 47$ км, возник 28.II 2013 г. перед глубоким Охотоморским землетрясением 24.V 2013 г., $M_W = 8.3$. В этом месте может оказаться южная граница области очага сильнейшего землетрясения с $M \geq 8.3$, заполняющей сейсмическую брешь участков 11б и 12б в Авачинском заливе и у берегов Южной Камчатки, см. рис. 1 и 2.

Повышение опасности в Камчатском сегменте дуги после Охотоморского землетрясения 24.V 2013 г.

Гигантское Охотоморское землетрясение 24.V 2013 г., $M_W = 8.3$, которое произошло на глубине 609 км, свидетельствует об исключительных по масштабу процессах, происходящих в глубокой части Камчатского сегмента Курило-Камчатской дуги. После него реальная сейсмическая опасность в районе г. Петропавловск-Камчатский на ближайшие годы может быть значительно выше, чем в представленном прогнозе.

После приведенных дополнений отметим главную последовательность результатов работы.

В разделе 1 дан Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013–VIII 2018 гг., составленный по применяемому методу.

³ При расчете значений для построения изолиний A_{10} использовалось осреднение в кругах радиусом $R = 50$ км, глубины очагов землетрясений выбирались в диапазоне $H = 0–80$ км.

⁴ Перед этим периодом времени, в 1994–2007 гг., в сейсмогенной зоне Курило-Камчатской дуги произошло четыре землетрясения с $M \geq 7.7$ на глубинах менее 100 км: Шикотанское землетрясение 4.X 1994 г., $M = 8.1$, $H = 33$ км; Кроноцкое землетрясение 5.XII 1997 г., $M = 7.8–7.9$, $H = 37$ км; Хоккайдское землетрясение 25.IX 2003 г., $M = 8.1$, $H = 27$ км; Средне-Курильское (Симуширское) землетрясение 15.XI 2006 г., $M = 8.2$, $H = 10$ км [Федотов и др., 1994, 1998б, 2004, 2007, 2008 и др.]. Эпицентры и области очагов показаны на рис. 1 и 2, участки 3, 14, 1 и 7. При этих землетрясениях происходили аналогичные явления – повышение сейсмичности у других сейсмических брешей дуги в течение года до и после этих землетрясений.

В разделе 2 рассмотрены сведения о возникновении и размещении курило-камчатских землетрясений 2008–2013 гг., которые дают дополнения к выводам раздела 1 о наиболее опасных участках полосы прогноза.

По данным раздела 2, вероятны размещение начала разрыва землетрясения с $M \sim 8$ в Авачинском заливе, участки 12а и 12б, и другого конца этого разрыва у южной оконечности Камчатки. Длина главного разрыва такого землетрясения может быть равной 350 км, а его магнитуда превышать величину $M = 8.3$.

По приведенному в разделе 1 прогнозу, наибольшая вероятность возникновения следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ имеется в Авачинском заливе и у Южной Камчатки, участки 12б и 11б, а также в районе Средних Курильских о-вов, участки 6–9, см. рис. 1. Именно в этих участках в 2008–2013 гг. наблюдалось сосредоточение землетрясений с $M \geq 6$, а также и роев, связанных с воздействием сильнейших землетрясений: Тохоку 11.ІІІ 2011 г., $M_w = 9.0$, и глубоких охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг., см. табл. 4, рис. 2, 3.

Дополнения, приведенные в разделе 2, подтверждают основные выводы раздела 1. Вопросы воздействия на сейсмичность Курило-Камчатской дуги сильных землетрясений, возникающих в регионах, прилегающих к ней, и на больших глубинах под Охотским морем, могут быть подробнее рассмотрены в других работах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы представленной работы заключаются в следующем.

1. Курило-Камчатская дуга является наиболее сейсмичным регионом России. Приведен долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги в наиболее активном интервале глубин 0–80 км на пять лет, ІХ 2013–VІІІ 2018 гг. Описание метода дано во Введении, работах [Федотов, 2005] и др.

По долгосрочному сейсмическому прогнозу на ІХ 2013–VІІІ 2018 гг., самая высокая сейсмическая опасность землетрясений с $M \geq 7.7$ по-прежнему сохраняется в районе г. Петропавловск-Камчатский, где вероятность возникновения при них сотрясений силой 7–9 баллов в эти годы достигает 42.0%. Вероятность того, что такое землетрясение произойдет в прибрежной части Авачинского залива и будет иметь силу 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский и катастрофические последствия, по полученным оценкам равна 13.3%. Вероятность возникновения здесь землетрясения с $M \geq 7.7$ в 3–4 раза больше средней в сейсмогенной зоне дуги. Вероятность того, что землетрясение с $M \geq 7.7$ произойдет в Авачинском заливе или у Южной Камчатки и будет иметь силу

8–9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, оценивается величиной 33.2%.

В Авачинском заливе и у берегов Южной Камчатки находится самая большая сейсмическая брешь Курило-Камчатской дуги, длина которой 350 км. В этой бреше возможно землетрясение с $M \geq 8.3$.

Дополнительные данные получены при рассмотрении роев землетрясений и других особенностей сейсмичности Курило-Камчатской дуги, наблюдавшихся в 2008–2013 гг. – периоде глубоких сильнейших землетрясений под Охотским морем: 5.VІІ 2008 г., $M_w = 7.7$, глубина $H = 633$ км, 14.VІІІ 2012 г., $M_w = 7.7$, $H = 583$ км, 24.V 2013 г., $M = 8.3$, $H = 609$ км, а также – гигантского землетрясения Тохоку 11.ІІІ 2011 г., $M_w = 9.0$, $H = 29$ км, произошедшего в прилегающем регионе Северо-Восточной Японии.

Рои землетрясений с $M_w = 5.2$ –6.0, возникавшие на Курило-Камчатской дуге незадолго до сильнейших землетрясений Тохоку, 11.ІІІ 2011 г., и Охотоморского, 24.V 2013 г., произошли в одном и том же месте протяженной Курило-Камчатской дуги – вблизи Авачинского залива и г. Петропавловск-Камчатский. Эти и другие данные подтверждают прогнозы самой высокой сейсмической опасности для этого района дуги. Она может быть здесь больше той, которая рассчитана по основной методике.

Вторым по уровню сейсмической опасности на ІХ 2013–VІІІ 2018 гг. сегментом Курило-Камчатской дуги являются участки дуги на Курильских островах, один из которых расположен к юго-западу от области очага Средне-Курильского (Симуширского) землетрясения 15.ХІ 2006 г., $M_w = 8.2$, а два остальных – к северо-востоку от него. Общая вероятность землетрясений с $M \geq 7.7$ в этих участках составляет 34.5%.

2. В полной мере сохраняется необходимость неотложных государственных мер по сейсмобезопасности, повышению устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в Камчатском крае и Сахалинской области.

3. Необходимы дальнейшее продолжение работ по данному методу долгосрочного сейсмического прогноза, дальнейшие исследования развития и закономерностей сейсмичности Курило-Камчатской дуги, развитие и совершенствование метода, его совместное применение с данными других методов сейсмического прогноза.

Возможно применение метода в других регионах мира со сходными строением, геодинамикой и сейсмичностью.

Приведенный долгосрочный сейсмический прогноз является одновременно прогнозом больших цунами.

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 РАН академик А.О. Глико, губернатор Камчатского края В.И. Илюхин неизменно поддерживали исследования и выдвигали необходимые предложения.

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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Захарова А.И., Рогожин Е.А.* Соотношение магнитуд сильных землетрясений с параметрами процессов их глубоководных фокусных шоков // Геофизические исследования. 2005. № 2. С. 27–32.
- Землетрясения России в 2006 году. Обнинск: ГС РАН, 2009. 216 с.
- Кейлис-Борк В.И., Кособоков В.Г.* Периоды повышенной вероятности возникновения для сильнейших землетрясений мира // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С. 48–58.
- Кособоков В.Г.* Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы. М.: ГЕОС, 2005, 175 с. (Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Вычислительная сейсмология. Вып. 36. Ч. 1).
- Рогожин Е.А.* Применение тектонофизических подходов в решении сеймотектонических задач на примере Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. на Средних Курилах // Физика Земли. 2013. № 5. С. 47–57.
- Родкин М.В.* Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 66–77.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А.* Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65–84.
- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
- Славина Л.Б., Левина В.И., Бабанова Д.Н.* Особенности возникновения и распределения роевых последовательностей землетрясений в сейсмоактивной зоне в акватории Тихоокеанского побережья Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Второй регион. научно-технич. конф. Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2009. С. 66.
- Соболев Г.А.* Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 63–72.
- Соболев Г.А.* Динамика современной сейсмичности Курило-Камчатской сейсмоактивной зоны // Вулканология и сейсмология. 2010. № 6. С. 3–14.
- Соболев Г.А., Завьялов А.Д.* О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // ДАН СССР. 1980. Т. 252. № 1. С. 69–71.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Федотов С.А.* О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. № 36(203). М: Наука, 1965. С. 66–93.
- Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 303 с.
- Федотов С.А., Потапова О.В., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С.* Последовательность опасных афтершоков ($M \geq 6$) при сильнейших землетрясениях ($M \geq 7.7$) Курило-Камчатской дуги и сходных структур // Вулканология и сейсмология. 1998а. № 6. С. 54–61.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2004–2008 гг. и ретроспективный прогноз Хоккайдского землетрясения 25 сентября 2003 г., $M = 8.1$ // Вулканология и сейсмология. 2004. № 5. С. 3–32.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006–2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения 15 XI 2006 г., $M = 8.2$ // Вулканология и сейсмология. 2007. № 3. С. 3–25.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д.* Афтершоки и область очага Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M = 8.2$; долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2008–III 2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 3–23.
- 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.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011–VIII 2016 гг.; вероятные место, время и развитие следующего сильнейшего землетрясения Камчатки с $M \geq 7.7$ // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 3–26.
- 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. // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 93–109.
- Федотов С.А., Чернышев С.Д.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги: достоверность в 1986–2000 гг., развитие метода и прогноз на

2001–2005 гг. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 3–34.

Федотов С.А., Чернышев С.Д., Матвиенко Ю.Д., Жаринов Н.А. Прогноз Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M = 7.8-7.9$, Камчатка, и его сильных афтершоков с $M \geq 6.0$ // Вулканология и сейсмология. 1998б. № 6. С. 3–16.

Федотов С.А., Чернышев С.Д., Чернышева Г.В., Викулин А.В. Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7\frac{3}{4}$ свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. 1980. № 6. С. 52–67.

Федотов С.А., Шумилиная Л.С., Чернышева Г.В., Потапова О.В. Долгосрочный сейсмический прогноз и развитие очага Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г. // Федеральная служба сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Экстренный выпуск. М: ФССНПЗ, 1994. С. 56–67.

Чебров В.Н., Викулина С.А., Дроздина С.Я. и др. Сильные землетрясения на Камчатке в 2013 году // Проблемы комплексного геофизического монито-

ринга Дальнего Востока России. Тр. Четвертой научно-технич. конф. Петропавловск-Камчатский, 29 сентября–5 октября 2013 г. Тезисы докладов. Обнинск: ГС РАН, 2013а. С. 132–136.

(http://emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Chebrov_etc.pdf).

Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Глубокое охотоморское землетрясение 24.05.2013 с магнитудой $M_w = 8.3$ – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013б. Вып. 21. № 1. С. 17–24.

Юнга С.Л., Рогожин Е.А., Родина С.Н. Алгоритм и методика анализа механизмов глубокофокусных очагов для выявления зон подготовки сильных землетрясений Курило-Охотского региона // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 3. С. 31–43.

Mogi K. Earthquake Prediction. Tokyo, New York, London: Academic Press, 1985. 355 p. (Русский перевод: Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.).

Nishenko S.P. Circum-Pacific seismic potential, 1989–1999 // PAGEOPH. 1991. V. 135. № 2/3. P. 169–260.

The Long-Term Earthquake Forecast for the Kuril–Kamchatka Island Arc for the September 2013 to August 2018 Period; The Seismicity of the Arc during Preceding Deep-Focus Earthquakes in the Sea of Okhotsk (in 2008, 2012, and 2013 at $M = 7.7, 7.7, \text{ and } 8.3$)

S. A. Fedotov^{a, b} and A. V. Solomatin^a

^a Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia
e-mail: fedotov@kscnet.ru, alf55@mail.ru

^b Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10 B. Gruzinskaya ul., Moscow, 123810 Russia
e-mail: karetn@list.ru

Received December 14, 2013

Abstract—Work was performed in 2008–2014 on the long-term prediction of great earthquakes at the Kuril–Kamchatka arc based on patterns that are observable in the locations of the rupture zones of great earthquakes (seismic gaps) and in the seismic cycle for such earthquakes. The prediction method has been successfully developed and applied to the region since 1965 (the LTEP method). This paper presents a long-term seismic forecast for the September 2013 to August 2018 period for the Kuril–Kamchatka arc earthquake-generating zone. The forecast predicts the following quantities for 20 constituent segments: phases of the seismic cycle, the normalized rate of small earthquakes A_{10} , the magnitudes of moderate-size earthquakes to be expected with probabilities 0.8, 0.5, and 0.15, the maximum possible magnitudes and probabilities of occurrence for great ($M \geq 7.7$) earthquakes in the most active depth interval, viz., 0–80 km. We also discuss the seismic process in this region for the 2008–2013 period, namely, the patterns that are observable in the locations of earthquake swarms, the values of and changes in several characteristics of the seismic process in the Kuril–Kamchatka seismic zone during the period 2008–2013, which occurred in relation with great shallow earthquakes beneath the Sea of Okhotsk (July 5, 2008, $M_w = 7.7$; August 14, 2012, $M_w = 7.7$; May 24, 2013, and the giant Tohoku earthquake of March 11, 2011 with $M_w = 9.0$). The results corroborate the high seismic hazard for the area of Petropavlovsk-Kamchatskii and the urgent necessity of continuing and intensifying the ongoing work on seismic retrofitting and seismic safety.