

УДК 557.341

**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., $M = 8.3$**

© 2017 г. С. А. Федотов^{1,2}, А. В. Соломатин¹

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

² Институт физики Земли РАН
123810 Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1

e-mail: karetn@list.ru

e-mail: alf55@mail.ru

Поступила в редакцию 05.07.2016 г.

Рассматриваются результаты продолжающихся работ по методу долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, основанному на закономерностях сейсмических брешей и сейсмического цикла. Дан прогноз на следующие 5 лет, IV 2016 – III 2021 гг. для всех участков сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги. Для 20 ее участков предсказываются стадии сейсмического цикла, нормированная характеристика числа слабых землетрясений (A_{10}), магнитуды землетрясений средней силы, ожидаемых с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15, максимальные ожидаемые магнитуды и вероятности возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$. Рассматривается развитие сейсмического процесса Курило-Камчатской сейсмогенной зоны до и после глубокого Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г., $M = 8.3$. Полученные результаты подтверждают очень высокую сейсмическую опасность в районе г. Петропавловск-Камчатский и полную необходимость продолжения и увеличения проводимых в нем работ по сейсмоукреплению и сейсmobезопасности. Приводятся практические результаты применения метода за 30-летний период.

DOI: 10.7868/S0203030617030014

**ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗУЕМОГО
МЕТОДА ДОЛГОСРОЧНОГО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ДЛЯ
КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ
И ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ**

Курило-Камчатская дуга, Курильские о-ва и Восточная Камчатка, являются наиболее сейсмичными районами России, в которых сейсмическая опасность является проблемой государственной важности. Существенная роль в решении этой проблемы принадлежит регулярным работам Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН по сейсмическому прогнозу, в том числе и ведущимся с 1965 г. работам по долгосрочному сейсмическому прогнозу (ДССП) для Курило-Камчатского региона.

Основы метода ДССП, применяемого в настоящем исследовании, используемые закономерности,

свойства сейсмичности и ее параметры, его обоснование, а также способы составления прогнозов приведены в работах [Федотов, 1965, 1968, 2005; Федотов и др., 1980, 2004; Федотов, Соломатин, 2015; и др.]. Ниже изложены краткие сведения, необходимые для понимания принципов построения и результатов прогноза по методу ДССП.

Долгосрочные пятилетние прогнозы сейсмической опасности для Курило-Камчатской дуги на основе метода ДССП составляются дважды в год. Они регистрируются в Совете Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и Камчатского филиала Единой геофизической службы (КФ ЕГС) РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов и совместно с другими прогнозами еженедельно передаются в сообщениях этого Совета в органы власти и заинтересованные организации.

Обновление прогнозов производится чаще, если в районе Курило-Камчатской сейсмогенной

зоны или в прилегающих регионах происходят сильные землетрясения, а также, если существенно меняются параметры сейсмического процесса. В этом случае для уточнения сейсмической опасности проводится комплексная оценка произошедших изменений.

Для составления прогнозов используются данные о параметрах сейсмического процесса за предшествующие 5 лет. К основной группе таких параметров относятся:

- сейсмическая активность A_{10} (1/год 10^3 км²) – нормированное число землетрясений энергетического класса $K_S = 10$, $M = 3.6$ [Федотов, 1968, 2005; и др.]; понятие “сейсмическая активность” было введено ранее Ю. В. Ризниченко [Ризниченко, 1968; и др.];

- относительная величина сброшенной сейсмической энергии $D = E_2/E_1$, где E_2 (Дж/год $\cdot 10^3$ км²) – текущая нормированная величина сейсмической энергии в пределах исследуемой области; $E_1 = 8.82 \cdot 10^{13}$ (Дж/год 10^3 км²) – аналогичная величина, усредненная по всей Курило-Камчатской сейсмогенной зоне в наиболее активной ее части за весь период наблюдений¹ [Федотов, 1968, 2005; и др.];

- параметр A_{11} (1/год $\cdot 10^3$ км²) аналогичен A_{10} , но определяется среднегодовым числом землетрясений средней силы ($K_S \sim 11-12$, $M \sim 4-5$) за более продолжительный (10–15 лет) интервал времени; для сопоставимости с A_{10} полученные значения экстраполируются в область $K_S = 10$ с учетом поправок, зависящих от наклона графика повторяемости и региональных поправок [Федотов и др., 2008; и др.].

При построении прогнозов предполагается циклическое развитие сейсмичности в очагах сильнейших ($M \geq 7.7$) с периодом сейсмического цикла длительностью 140 ± 60 лет или 120 ± 50 лет [Федотов, 1968, 2005]. Весь цикл делится на три основные стадии: I – стадия афтершоковых процессов (продолжительность до 15–20 лет), II – длительная стадия стабильного накопления упругой энергии (65–110 и более лет), III – завершающая стадия (менее 15–20 лет), характеризующаяся значительным количеством накопленной энергии, высокой нестабильностью сейсмического процесса, активизациями, затишьями, а также форшоками.

Долгосрочные прогнозы рассчитываются для наиболее активной полосы Курило-Камчатской сейсмогенной зоны с глубинами очагов 0–80 км и шириной 100 км, находящейся под континентальным склоном глубоководной впадины дуги, где происходят более

85% землетрясений Курило-Камчатской сейсмогенной зоны и находятся гипоцентры всех тех землетрясений, которые могут вызвать сотрясения силой более 8 баллов на Курильских о-вах и Восточном побережье Камчатки.

Полоса прогноза для Курило-Камчатской дуги делится в среднем на 20 участков длиной от 100 до 200 км, сравнимых по размеру с очагами сильнейших землетрясений (рис. 1). Для них на следующий 5-летний период прогнозируется ряд характеристик сейсмичности, основными из которых являются: стадии сейсмического цикла, нормированная характеристика числа слабых землетрясений (A_{10}), магнитуды землетрясений средней силы, ожидаемых с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15, максимальные ожидаемые магнитуды и вероятности возникновения сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$.

Первой прогнозируемой характеристикой каждого из рассматриваемых участков и их групп является стадия сейсмического цикла, которую они проходят. К наиболее вероятным участкам следующих сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений в соответствии с используемыми закономерностями развития сейсмического процесса относятся сейсмические бреши – участки, в которых таких землетрясений не было в течение последних 80 лет, и которые могут проходить III, завершающую, стадию сейсмического цикла. Для таких участков указываются максимальные ожидаемые магнитуды M_{\max} сильнейших землетрясений в них и условная вероятность таких землетрясений в следующее пятилетие $P(M \geq 7.7)$.

Первое значение величины $P(M \geq 7.7)$ заключается в том, что она является оценкой вероятности возникновения следующего сильнейшего землетрясения региона в данном участке. В то же время она является приближенной оценкой возникновения такого землетрясения в этом участке в течение следующего пятилетия, так как сильнейшие землетрясения повторяются на Курило-Камчатской дуге в среднем так же один раз в 5 лет. Таким образом, сумма $P(M \geq 7.7)$ во всех участках при построении 5-летних прогнозов условно принимается равной 100% [Федотов, 2005; Федотов и др., 2007, 2008, 2011, 2012; Федотов, Соломатин, 2015].

Сейсмическая опасность участков, проходящих III, заключительную, стадию сейсмического цикла, сейсмических брешей, отражаемая оценкой вероятности $P(M \geq 7.7)$, определяется по степени активизации наблюдаемых в них сейсмических процессов. Как было показано в работах [Федотов, 1968, 2005; Федотов и др., 1980, 2008, 2012; и др.], такая активизация характерна для заключительной стадии развития очагов сильнейших землетрясений.

Вероятностная оценка $P(M \geq 7.7)$ строится для каждой из сейсмических брешей на основе оценок вероятности случайного появления наблюдаемых в ней значений A_{10} , D , A_{11} на II (спокойной)

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

стадии сейсмического цикла: $P(A_{10})$, $P(D)$ и $P(A_{11})$ [Федотов и др., 1980, 2008]: $V(A_{10}, D) = P(A_{10}) \cdot P(D)$, $V_1(A_{10}, D, A_{11}) = P(A_{10}) \cdot P(D) \cdot P(A_{11})$ или $V_2(A_{10}, D, A_{11}) = (P(A_{10}) + P(D) + P(A_{11}))/3$. При этом прогнозная величина $P(M \geq 7.7)$ в рассматриваемом участке считается пропорциональной величине $(1-V)$ и длине этого участка [Федотов, 2005; Федотов и др., 2011, 2012; и др.].

Менее опасными являются участки, проходящие I и II стадии сейсмического цикла. Для них также указываются оценки сейсмической опасности $P(M \geq 7.7)$, определенные на основе нормального распределения длительностей сейсмического цикла 140 ± 60 лет или 120 ± 50 лет [Федотов, 2005; и др.].

Таким образом, успешно выделяются 2–3 наиболее опасные сейсмические бреши Курило-Камчатской дуги [Федотов и др., 2007, 2008, 2011, 2012; и др.]. Другие параметры также приводятся в результатах прогнозов [Федотов, 2005; и др.].

Статья имеет следующую структуру. Во Введении изложены основы метода ДССП. В Разделе 1 приведен долгосрочный сейсмический прогноз на IV 2016 – III 2021 гг. для Курило-Камчатской дуги, построенный по данным на апрель 2016 г. В Разделе 2 рассматриваются особенности сейсмичности 2012–2016 гг., связанные с подготовкой Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г. Там же приведены дополнения к данным прогноза ДССП. В Заключение приведены главные результаты долгосрочного сейсмического прогноза, результаты его уточнения; рассмотрены практическое значение и вопросы дальнейшего применения метода.

1. ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА IV 2016 – III 2021 гг. (по оценкам на апрель 2016 г.)²

Прогноз составлен по методу ДССП на следующие пять лет, VI 2016 – III 2021 гг., в обновление предыдущего прогноза, составленного на IX 2015 – VIII 2020 гг. Исходные данные взяты из региональных каталогов КФ и СФ ЕГС РАН (<ftp://ftp.gsras.ru>) за предшествующие 5 лет, III 2011 – III 2016 гг. Для анализа сейсмической обстановки на основе сильных землетрясений с $M \geq 5$ использовался каталог NEIC (<https://earthquake.usgs.gov/>). Результаты приведены в табл. 1 и на рис. 1.

На рис. 1 представлены основные результаты прогноза для верхней части сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги, находящейся на глубинах $H \leq 80$ км, показано положение 20 участков

наиболее активной полосы сейсмогенной зоны, для которой прогнозируются характеристики сейсмичности (см. табл. 1), а также, вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$ в ней, Введение.

Табл. 1 построена на основе данных о сейсмичности за предыдущее пятилетие в пределах каждого из участков с использованием оценок параметров A_{10} , D , A_{11} , Введение. Оценки прогнозируемой сейсмической опасности в табл. 1 определены на основе этих трех параметров. Для сравнения в табл. 1 показаны также вероятности землетрясений с $M \geq 7.7$ и относительная опасность сейсмических брешей, полученные при предыдущем долгосрочном сейсмическом прогнозе на IX 2015 – VIII 2020 гг. Погрешность вычисления вероятностей $P(M \geq 7.7)$ в сейсмических брешах оценивается величиной 2–3%.

Продолжение долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на IV 2016 – III 2021 гг., составленного по основной методике

Основные результаты долгосрочного сейсмического прогноза на IV 2016 – III 2021 гг. по всем 20 участкам, на которые разделена наиболее активная часть сейсмогенной зоны у Курильских островов и Камчатки (см. рис. 1, табл. 1), заключаются в следующем.

Наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ и глубиной очагов $H \leq 80$ км на период IV 2016 – III 2021 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 19.0%;
- для Авачинского залива (участок 12б, см. рис. 1) вероятность землетрясения $M \geq 7.7$, имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 12.8%.

Суммарная вероятность возникновения землетрясений с $M \geq 7.7$, имеющих силу 8–9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, на ближайшие пять лет в двух наиболее опасных участках 11б, 12б, образующих протяженную сейсмическую брешь длиной 350 км, равна 31.8% (см. рис. 1, табл. 1).

Землетрясения, имеющие силу 7–8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, с меньшей вероятностью 11.9% могут также произойти в участках 11а, 12а, 13а, 13б (см. рис. 1, табл. 1).

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 43.7% в период времени IV 2016 – III 2021 гг. При этом вероятность

² Зарегистрирован 21.04.2016 г. в Совете ИВиС ДВО РАН и КФ ЕГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов.

Таблица 1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2016 – III 2021 гг. ($N \leq 80$ км), полученный с использованием параметров A_{10} , D , A_{11}

Участок	Δ , км	Район	Стадия цикла и ее оценка по данным 2011–2016 гг. (III 2011 г.– III 2016 г.)					Прогноз на IV 2016 – III 2021 гг.							Вероятная очередность		
			Стадия	$P_1 = P(A_{10})$	$P_2 = P(D)$	$P_3 = P(A_{11})$	$V = (P_1 * P_2 * P_3)$	$A_{10}(P \sim 0.7)$		$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$	M_{max}	$P(M \geq 7.7)\%$			
								A_{10}	$A_{10} \pm \sigma$					7.1		(6.8)	7
1	0–100	Мыс Сириха – п-ов Немуро	III?	0.63	0.73	0.54	0.25	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	7.1	(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		1.1	(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		2.2	(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	(1.9)		
6	600–750	Мыс Кастрикум – пролив Буссоль	III?	0.99	0.50	0.67	0.33	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	9.5?	(9.7?)	4–6?	(4–6?)
7	750–950	О-в Смушир – пролив Крузеншгерна	I					1.5	1.1–2.8	6.0	6.5	7.0		0.5	(0.5)		
8	950–1100	О-в Шиашкотан	III?	0.85	0.36	0.79	0.25	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	10.7?	(12.1?)	3?	(2–3?)
9	1100–1200	О-в Онекотан – пролив 3-й Курильский	III	0.28	0.03	0.51	0.01	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	9.5	(9.6)	4–6	(4–6)
10	1200–1350	О-в Парамушир – мыс Лопатка	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.6	(2.5)		
11а	1350–1550	Юг Камчатки, Ю-В	II					0.8	0.6–1.1	5.8	6.3	6.8		3.5	(3.4)		
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.54	0.01	0.28	0.002	1.3–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.2	19.0	(19.2)	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		2.6	(2.5)		
12б	1550–1700	Залив Авачинский – п-ов Шипунский, С-З	III	0.68	0.72	0.21	0.10	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	12.8	(12.1)	2	(2–3)
13а	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III?	0.91	0.98	0.83	0.74	1.2–3	0.8–4.5	5.9	6.4	6.9	8.0	3.7	(3.2)	8	(8)
13б	1700–1850	Залив Кроноцкий, С-З	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		2.1	(2.1)		
14	1850–1950	П-ов Кроноцкий	II					1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		0.4	(0.4)		
15	1950–2050	Залив Камчатский	III	0.57	0.84	0.13	0.06	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	8.9	(9.2)	4–6	(4–6)
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							$\Sigma = 100.0$			

Примечание. Даны прогнозы восьми характеристик сейсмичности на IV 2016 – III 2021 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 да 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. Выделены оценки вероятности сильнейших землетрясений $P(M \geq 7.7)$ и их очередность. Значения вероятности $P(M \geq 7.7)$ в скобках соответствуют их предельным величинам на IX 2015 – VIII 2020 гг. Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ 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.

возникновения в этот период времени в г. Петропавловск-Камчатский землетрясения силой 9 баллов равняется 12.8%, а землетрясений силой 8 и 7 баллов – 30.9% (см. табл. 1, рис. 1).

По предшествующему прогнозу, данному на IX 2015 – VIII 2020 гг., вероятности землетрясений в г. Петропавловск-Камчатский силой 7–9, 9 и 7–8 баллов равнялись 42.5%, 12.1% и 30.4%, соответственно. Таким образом, сейсмическая опасность для г. Петропавловск-Камчатский за период времени IX 2015 – III 2016 г. немного, в пределах ошибки определения, возросла и остается на очень высоком уровне. Опасность 9-балльных землетрясений в г. Петропавловск-Камчатский в настоящее время 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 районе залива Камчатский (участок 15, см. рис. 1, табл. 1), где вероятность сильнейшего землетрясения на период IV 2016 – III 2021 гг. оценивается величиной 8.9%.

На Курильских островах наиболее высока сейсмическая опасность в районе Средних Курильских о-вов (6, 8 и 9 участки, см. рис. 1, табл. 1) – общая вероятность сильнейшего землетрясения $M \geq 7.7$ для него сохранилась и составляет 29.7%.

В участках 6 и 8 находятся концы главных разрывов Средне-Курильского, Симуширского землетрясения 15.XI.2006 г., $M = 8.2$ [Федотов и др., 2007, 2008, 2011; и др.] (см. рис. 1). Здесь же наблюдается наибольшая активность в Курильской части дуги. Значение вероятности сильнейшего землетрясения в 8 участке на период IV 2016 – III 2021 гг. является третьим по величине на Курило-Камчатской дуге и оценивается величиной 10.7%, а в 6 и 9 участках – 9.5% и 9.5%, соответственно. Знак вопроса для участков 6, 8 поставлен потому, что уровень сейсмичности здесь может быть завышен вследствие продолжающегося влияния 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., $M_w = 7.7$, $H = 583$ км (см. рис. 1).

Участок 1 возле п-ова Немуро (см. рис. 1, табл. 1) является седьмым по степени опасности, $P(M \geq 7.7) = 7.1\%$, в период IV 2016 – III 2021 гг.

В остальных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность возникновения сильнейших землетрясений $P(M \geq 7.7)$ равна средней пятилетней, которая равна 3.6–4.2%, или существенно, до 10–15 раз, ниже ее. В целом же пятилетняя $P_{7.7} = 0.4–20\%$ меняется в разных участках Курило-Камчатской дуги почти на два порядка величины, в зависимости от стадии сейсмического

цикла и развития сейсмического процесса в них (см. рис. 1, табл. 1).

Дополнительные данные о максимумах сейсмической активности A_{10}

Для детального исследования сейсмичности Курило-Камчатской дуги за период I 2008 – III 2016 гг. была построена карта изолиний максимальных значений сейсмической активности A_{10} с усреднением по участкам радиусом 50 км (рис. 2). При ее построении использовались отклонения параметра $\lg(A_{10})$ от его средней долговременной величины в единицах стандартного отклонения $\sigma(\lg(A_{10}))$ [Федотов и др., 2008].

Максимальные значения A_{10} наблюдались в двух областях на границах гигантского очага Камчатского землетрясения 1952 г., $M = 8.5$. При этом самый высокий уровень A_{10} отмечен вблизи участка 12 на продолжении линии эпицентр Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г. – Авачинский залив (см. рис. 2). В наибольшей мере этот максимум был определен удаленной форшоковой активизацией 18–24.V.2013 г., происходившей здесь непосредственно перед указанным землетрясением.

Вторая область аномально высокой сейсмической активности отмечается в участке 9.

В целом, две указанные области аномальной сейсмической активности ограничивают проекцию глубокого очага Охотоморского землетрясения в область неглубоких землетрясений, примыкающую к глубоководному желобу, и находятся по краям области очага гигантского Камчатского землетрясения 5.XI.1952 г. (см. рис. 2). Этот факт, а также точное совпадение времени указанной активизации на границе участка 12 со временем глубокого Охотоморского землетрясения, по-видимому, указывают на существование связи сейсмогеодинамических процессов в глубокой и верхней частях сейсмогенной зоны и положение наиболее напряженных участков верхней части Курило-Камчатской сейсмогенной зоны.

Еще две области высокой сейсмической активности в период 2008–2016 гг. отмечаются на юго-западной и северо-восточной границах участка 6, на которые проектируется область очага предыдущего глубокого сильнейшего землетрясения 14.VIII.2012 г., $M = 7.7$ (см. рис. 2).

Таким образом, есть основания предполагать, что все четыре выделенных выше области высокой сейсмической активности были в значительной степени определены влиянием очагов глубоких охотоморских землетрясений 2012–2013 гг. Эти же области совпадают с границами выделенных на основе ДССП опасных сейсмических брешей, рис. 1 и 2.

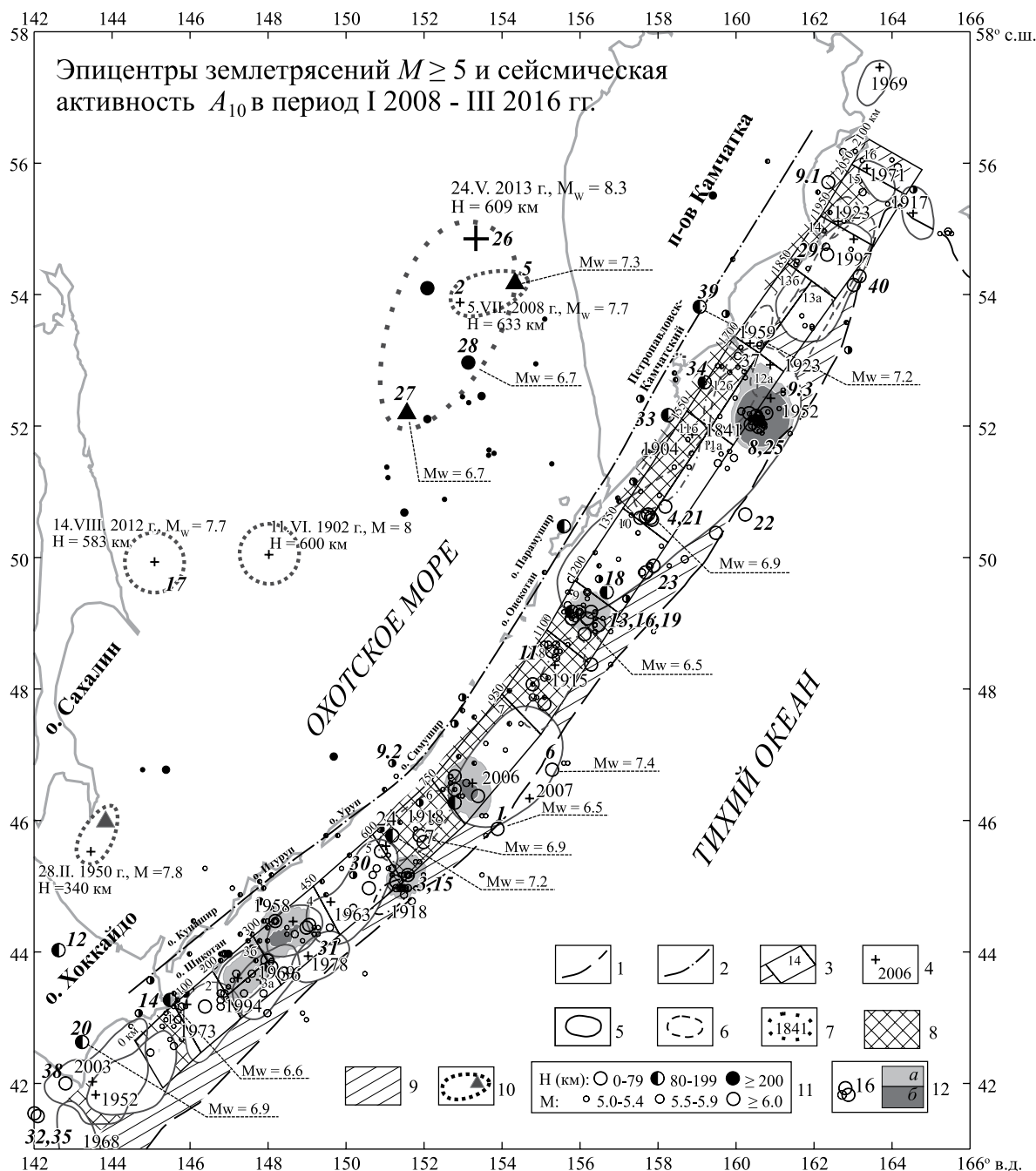


Рис. 2. Карта Курило-Камчатской сейсмогенной зоны с указанием положения участков прогноза, очагов сильнейших ($M \geq 7.7$) курило-камчатских землетрясений 1841–2016 гг., эпицентров более слабых землетрясений ($M \geq 5$) I 2008 – III 2016 гг. и их роев, а также сейсмической активности A_{10} этих лет на глубинах 0–80 км.

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 – вероятные области очагов неглубоких землетрясений 1904–1918 гг. и предполагаемая область очага 1841 г., $M \geq 7.7$; 8 – наиболее вероятные места следующих неглубоких землетрясений с $M \geq 7.7$; 9 – возможные места следующих таких землетрясений; 10 – предполагаемые границы областей очагов глубоких землетрясений с $M \geq 7.7$, происшедших в 1902, 1950, 2008, 2012 и 2013 гг., и положение их главных афтершоков; 11 – эпицентры более слабых ($M \geq 5$) землетрясений, произошедших в период I 2008 – III 2016 гг., представленные с разбиением по интервалам глубин и магнитуд; 12 – номера наиболее сильных землетрясений и сейсмических активизаций этого периода, табл. 2 (a, б – уровни изолинии $\lg(A_{10})$, соответственно равные превышению на 1 и 2 единицы стандартного отклонения $\sigma(\lg(A_{10}))$ их среднего долговременного значения, подробности в тексте).

2. РАЗВИТИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ ДО И ПОСЛЕ ГЛУБОКОГО ОХОТОМОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 24.V.2013 г., $M = 8.3$

Локальные активизации сейсмичности

В Разделе 1 рассматривался вопрос о распределении в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне слабой, $K_s \sim 10 \div 11$, сейсмичности. Для ее определения использовался параметр A_{10} – сейсмическая активность, усредненная по пятилетнему периоду. Другой важной и в определенной степени независимой характеристикой сейсмического процесса являются локальные активизации – компактные во времени и в пространстве группы землетрясений, связанные с отдельными сильными землетрясениями, их форшоковыми и афтершоковыми процессами, а также роями землетрясений. Эти активизации в качестве откликов сейсмогенной среды на внешние воздействия указывают на области повышенных концентраций напряжений. Такие активизации присущи стадиям укрупнения трещин и их стягивания к плоскости будущего магистрального разрыва, наблюдавшимся в лабораторных экспериментах [Соболев, Пономарев, 2003]. Способ выделения таких активизаций описан в работе [Федотов, Соломатин, 2015].

В 2008–2013 гг. на Курило-Камчатской дуге, под Охотским морем, а также на ее продолжении, Северо-Восточной Японии произошел ряд примечательных сильнейших землетрясений. В наиболее общем виде сейсмичность Камчатского сегмента дуги этого периода рассмотрена в работах [Салтыков, Кравченко, 2009; 2011; Салтыков и др., 2013; Чебров и др., 2013, 2016; Сильные камчатские ..., 2014]. Свойствам сейсмичности Курильского сегмента дуги в период 2012–2013 гг. посвящена работа [Сафонов и др., 2015].

Сейсмический процесс на Курило-Камчатской дуге в 2008–2013 гг. исследовался также в работе [Федотов, Соломатин, 2015]. Рассмотрим дальнейшее развитие сейсмического процесса в пределах Курило-Камчатской дуги в X 2013 – III 2016 гг. Его важные свойства и особенности показывают последовательность и размещение землетрясений Курило-Камчатской дуги с $K_s \geq 14.0$ ($M \geq 6$) (табл. 2).

В настоящей работе использованы данные о курило-камчатских землетрясениях внутри и за границами полосы прогноза шириной 100 км, протянувшейся вдоль наиболее активной части сейсмогенной зоны (Раздел 1) за период I 2008 – III 2016 гг., в том числе данные о глубоких землетрясениях с $M_w = 7.7-8.3$, а также данные о примечательных активизациях этого времени и наиболее значимых ($K_s \geq 14.0$, $M \geq 6$) событиях во всем наблюдавшемся диапазоне глубин их гипоцентров (0–650 км).

Пространственно-временное развитие сейсмичности дуги в 2012–2016 гг.

Для изучения временной связи сейсмических событий рассматривалась пространственно-временная развертка сейсмического процесса (рис. 3). В табл. 2 и на рис. 2, 3 указаны одинаковые номера последовательности землетрясений и роев.

На временной развертке, рис. 3, в качестве дополнения к координате времени (горизонтальная ось) использовалось расстояние Δ км, определяемое вдоль проекции эпицентров землетрясений на центральную линию наиболее активной полосы ее сейсмогенной зоны, участки 1–16 на рис. 1, 2. На рис. 3 выделены землетрясения интервалов глубин 0–79, 80–199 и 200–650 км.

Как и ранее, здесь изучается связь исследуемых наиболее значимых событий с важнейшими сейсмическими явлениями региона – сильнейшими глубокими землетрясениями 2008–2013 гг. Отмеченная связь землетрясений в рамках единого сейсмического процесса может быть в значительной мере обусловлена блоковой раздробленностью структуры Курило-Камчатской дуги крупными поперечными тектоническими разломами.

Хорошим примером такой связи является отмеченное в работе [Сафонов и др., 2015] развитие Урупской серии неглубоких землетрясений в июле 2012 г. – августе 2013 г. (№№ 15 и 24, см. табл. 2), сопровождавшее процесс развития сильнейших глубоких охотоморских землетрясений 14.VIII.2012 г., $M = 7.7$, и 24.V.2013 г., $M = 8.3$, (№№ 17 и 26, см. табл. 2, рис. 2 и 3).

Существует влияние на локальную сейсмичность и очень удаленных сильных событий [Федотов, Соломатин, 2015]: гигантское землетрясение в Тохоку (регион Восточной Японии на острове Хонсю) 11.III.2011 г., $M = 9$, № 10 в табл. 2 и на рис. 3, оказало влияние на ход сейсмических процессов, в том числе и на Камчатке. После сейсмического затишья, наблюдавшегося на Камчатке в 2010 г., практически одновременно с этим гигантским землетрясением возникли активизации №№ 9.1, 9.2 и 9.3 (см. рис. 2 и 3, табл. 2). При этом одна из них, № 9.3, происходила 4–9.III.2011 г. в наиболее опасном, близком к г. Петропавловск-Камчатский районе – на внешней границе участка 12.

Выделим наиболее важные черты сейсмического процесса Курило-Камчатской дуги в 2012–2013 гг.

Перед глубоким охотоморским землетрясением 14.VIII.2012 г., $M = 7.7$, $H = 583$ км, в течение 4 месяцев перед ним наблюдались сейсмические активизации и землетрясения с $M = 5.6-6.0$ в расположенных над ним в сейсмических брешах Курильского сегмента дуги – участках 1, 6, 7 и 9, события № 13–16 в табл. 2 и на рис. 2 и 3.

Таблица 2. Землетрясения энергетического класса $K_S \geq 14.0$ ($M_w \geq 6$) и наиболее сильные сейсмические активизации Курило-Камчатского региона в период I 2008 – III 2016 гг.

№ п.п.	Времена сильных землетрясений или наиболее сильных событий активизаций	Координаты сильных землетрясений или наиболее сильных событий активизаций			Временные интервалы активизаций	Энергетические классы K_S (магнитуды M_w) сильных землетрясений или наиболее сильных событий активизаций	
		° 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	15.I.2009	46.8	155.4	41	28.XII.2008–22.I.2009	15.5 (7.4)	
7	7.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	5.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 (6.0)	
12	21.X.2011	44.0	142.7	175		14.4 (6.3)	
13	14.IV.2012	49.2	155.9	90	13–24.IV.2012	14.0 (5.6)	
14	4.V.2012	43.3	145.6	92		14.5 (6.6)	
15	8.VII.2012	45.2	151.7	43	4–17.VII.2012	14.0 (6.0)	
16	20.VII.2012	49.1	156.3	43	20–21.VII.2012	14.2 (6.0)	
17	14.VIII.2012	49.6	145.5	587		(7.7)	
18	16.X.2012	49.5	156.8	87	14–22.X.2012	14.0 (5.6)	
19	16.XI.2012	49.1	155.9	72		14.9 (6.5)	
20	2.II.2013	42.6	143.3	119	1–2.II.2013	15.6 (6.9)	
21	28.II.2013	50.7	157.9	47	28.II–4.III.2013	15.3 (6.9)	
22	24.III.2013	50.7	160.4	42	24.III–9.IV.2013	14.0 (5.9)	
23	19.IV.2013	49.9	157.8	60	19–25.IV.2013	14.1 (6.1)	
24	19.IV.2013	45.8	151.3	118	19–21.IV.2013	16.3 (7.2)	
25	21.V.2013	52.1	160.5	48	18–24.V.2013	14.4 (6.1)	
26	24.V.2013***	54.9	153.2	598		(8.3)	
27	24.V.2013*	52.1	151.8	642		15.0 (6.7)	
28	1.X.2013	53.0	153.3	605		15.2 (6.7)	
29	12.XI.2013	54.6	162.5	72	12–13.XI.2013	15.0 (6.4)	
30	25.XI.2013	45.6	151.0	34		13.6 (6.0)	
31	20.VII.2014	44.4	149.1	75		15.5 (6.2)	
32	10.VIII.2014	41.6	142.0	42		(6.1)	
33	2.X.2014	52.2	158.4	148		14.0 (5.7)	
34	19.II.2015	52.7	159.3	90		13.8 (5.4)	
35	8.VI.2015	41.6	142.0	42		(6.1)	
36	7.VII.2015	43.8	148.2	67	5–11.VII.2015	15.4 (6.3)	
37	17.IX.2015	53.1	160.2	62		13.3 (5.4)	
38	14.I.2016	42.0	142.8	46		(6.7)	
39	30.I.2016	53.8	159.1	185	30–31.I.2016	15.7 (7.2)	
40	20.III.2016	54.2	163.1	61		14.9 (6.4)	

Примечания. * – сильнейшие афтершоки; ** – гигантское землетрясение Тохоку у берегов Северо-Восточной Японии. *** – сильнейшее глубокое Охотоморское землетрясение. Жирным шрифтом выделены наиболее сильные ($M \sim 6.5–9$) землетрясения. Положение эпицентров землетрясений указано на карте (см. рис. 2) и на временной развертке (см. рис. 3).

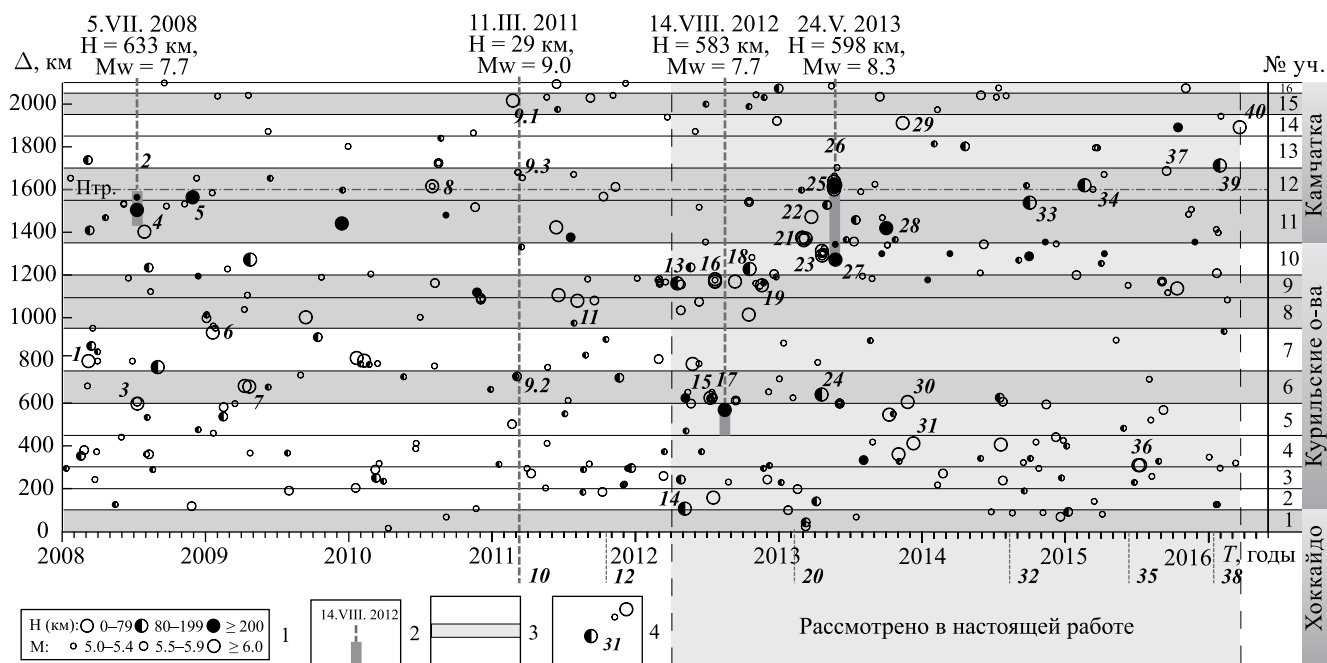


Рис. 3. Пространственно-временная развертка сейсмического процесса вдоль Курило-Камчатской островной дуги в I 2008 – III 2016 гг. Расстояние Δ км соответствует проекции эпицентров землетрясений на центральную линию вдоль наиболее активной части ее сейсмогенной зоны, участки 1–16 на рис. 1 и 2 в табл. 1.

1 – пространственно-временная проекция эпицентров землетрясений $M = 5.0–7.4$, произошедших в период I 2008 – III 2016 гг. с разбиением по интервалам глубин и магнитуд на осевую линию полосы прогноза, идущей вдоль наиболее активной части сейсмогенной зоны дуги, участки 1–16 на рис. 1, 2 и в табл. 1; 2 – то же для очагов сильнейших глубоких землетрясений 2008, 2012, 2013 гг., а также дата сильнейшего удаленного землетрясения Тохоку (см. рис. 2, табл. 2); 3 – сегменты проекции, соответствующие сейсмическим брешам в участках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны (см. рис. 1, 2, табл. 1); 4 – нумерация наиболее сильных землетрясений в соответствии с табл. 2, значения ниже оси времени относятся к событиям за пределами полосы прогноза, рис. 2.

Урупская серия землетрясений, июль 2012 – апрель 2013 гг. (события №№ 15 и 24, участок 6, см. табл. 2, рис. 2 и 3) была продолжительной (около года) и имела сложный характер: на ее заключительной стадии произошло смещение первоначальной сейсмической активизации на северо-северо-запад и вглубь в сторону очага Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г. Максимальным событием, определившим это смещение, было сильное, $M = 7.2$, землетрясение 19.IV.2013 г. (№ 24, см. табл. 2, рис. 2 и 3) с промежуточной глубиной $H = 118$ км. Оно было показателем повышения напряжений в сейсмофокальной зоне перед Охотоморским землетрясением 24.V.2013 г.

В период между крупными глубокими землетрясениями 14.VIII.2012 г., $M = 7.7$, $H = 583$ км и Охотоморским землетрясением 24.V.2013 г., $M = 8.3$, № 26, на глубине менее 200 км происходило перемещение (стягивание) гипоцентров землетрясений № 18, 19, 21–23, 25 от сектора участка 6 к секторам 11–12 – проекции очага сильнейшего Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г. (см. рис. 2 и 3). Эта особенность показывает, как его подготовка проявилась также в области неглубоких землетрясений

наиболее активной части Курило-Камчатской сейсмогенной зоны.

Таким образом, в период 2012–2013 гг. наблюдалась предшествующая миграция сейсмичности (в том числе и быстрая, в течение нескольких суток) неглубоких землетрясений Курило-Камчатской сейсмогенной зоны и ее промежуточных землетрясений с глубиной очага 80–200 км в сторону секторов, проекций очагов следующих глубоких землетрясений с $M \geq 7.7$ на верхнюю часть дуги. Такие явления согласуются с моделью взаимосвязи землетрясений на всем протяжении глубин погружающихся литосферных плит [Mogi, 1985; Юнга и др., 2011; Рогожин и др., 2011].

После Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г., $M_w = 8.3$, № 26, в 2014–2016 гг. землетрясения с промежуточной глубиной очага (80–200 км) № 33, 34 и 39 ($M_w = 7.2$) сосредоточились в Камчатском сегменте Курило-Камчатской дуги вокруг участка 12б вблизи наиболее опасной в регионе сейсмической брешы (см. рис. 1, 2, 3).

Среди них было примечательное Жупановское землетрясение с $M_w = 7.2$, которое произошло

30.I 2016 г. на глубине 185 км в районе Жупановского вулкана (№ 39) [Чебров и др., 2016] (см. рис. 2).

Редкие сильные землетрясения с промежуточной глубиной очага 80–200 км могут представлять опасность в их эпицентральной области. Землетрясение 24.XI.1971 г. с $M = 7.3$, произошедшее на глубине в 100 км, имело силу 7 баллов в г. Петропавловск-Камчатский [Сильные камчатские ..., 1975]. Существенно, что вероятность возникновения землетрясений на глубине 80–200 км на порядок меньше, чем на глубинах менее 80 км в наиболее активной полосе сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги, а их балльность быстро убывает с глубиной очага.

После сильнейшего глубокого Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г., $M = 8.3$, сейсмическая активность в Камчатском сегменте Курило-Камчатской сейсмогенной зоны в наибольшей степени повышалась в области землетрясений с глубинами 90–185 км на продолжении сейсмогенной зоны дуги в сторону глубоководного желоба от очага Охотоморского землетрясения, участки 11–12 на рис. 2 и 3.

Дополнения к долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курило-Камчатской дуги на IV 2016 – III 2021 гг.

На проекции области глубокого очага Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г. в зону неглубоких землетрясений дуги расположена протяженная и наиболее опасная в настоящее время сейсмическая брешь дуги длиной 350 км. Вероятно, что область очага следующего сильнейшего землетрясения размером 500 км и $M > 8.3$ может продлиться из участков 11 и 12 в участок 10. На краях участка 10 сосредоточились примечательные рои землетрясений № 4, 21 (2008 и 2013 гг.) и № 13, 16, 18 и 19 (2012 г.) (см. табл. 2 и рис. 2). В этих местах может оказаться южный конец главного разрыва нового сильнейшего камчатского землетрясения.

Развитие сейсмичности дуги в 2008–2016 гг. показывает, что сейсмическая опасность в участках 11, 12, а также в участке 10, от Авачинского залива до Северных Курильских о-вов может быть выше уровня, определенного для них по апробированным методикам ДССП, Раздел 1.

Район Авачинского залива, участок 12, как и весь Камчатский сегмент дуги, участки 11–15, в настоящее время являются наиболее активной частью дуги (см. рис. 3). Это обусловлено направленным развитием сеймотектонических процессов дуги после глубокого Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г.

В Курильском сегменте дуги после Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г. наблюдается значимое понижение сейсмичности в участках 6–8, в пределах протяженной сейсмической брешки на Средних Курилах, второй по уровню опасности на дуге (см. рис. 1, 2, табл. 1). Согласно методу ДССП, это может повлечь некоторое снижение опасности указанных участков.

Обращает на себя внимание активизация в области неглубоких южно-курильских землетрясений в период 2011–2016 гг. в участках 2–5 (см. рис. 1–3), не являющихся сейсмическими брешками. На основании временной развертки, рис. 3, можно отметить, что начало этой активизации соответствует времени гигантского землетрясения Тохоку 11.III.2011 г. Таким образом, отмечается сильное и долговременное влияние этого землетрясения на южно-курильские участки сейсмогенной зоны, не являющиеся сейсмическими брешками. Это может означать значительное перераспределение напряжений в области, занимающей начало полосы прогноза, участки 2–5, и возможное долговременное повышение вероятности сильнейшего землетрясения в этой области по сравнению с величинами, приведенными в Разделе 1.

Огромная сейсмическая энергия накоплена в Камчатском сегменте сейсмогенной зоны, особенно в сейсмической брешке, представленной участками 11 и 12 (см. рис. 1, 2). Она по величине соответствует землетрясению с $M \sim 8–9$ [Федотов и др., 2011]. На основе полученных результатов сделан независимый вывод о наибольшей сейсмической опасности на ближайшие годы именно этих участков.

Развитие сейсмичности Курило-Камчатской дуги в 2008–2016 гг. до, во время и после глубоких охотоморских землетрясений 5.VII.2008 г., 14.VIII.2012 г. и 24.V.2013 г. с $M = 7.7, 7.7, 8.3$ было мощным, редким и очень интересным процессом. В данной работе кратко рассматриваются события этого процесса, происходившие в 2013–2016 гг. Пространственно-временная развертка сейсмического процесса дуги в эти годы показана на рис. 3. На ней видно, что сейсмичность дуги была различной в ее трех главных сегментах. Она была наиболее высокой в Камчатском сегменте, где находятся наиболее опасные участки дуги, 11 и 12, в районе г. Петропавловск-Камчатский.

Сейсмическая активность была повышенной в сегменте Южных Курильских о-вов. Но это, по-видимому, не свидетельствует о высокой опасности, так как здесь, в участках 2–5, нет сейсмических брешек, проходящих III, заключительную стадию сейсмического цикла.

Наименьшая интенсивность сейсмической деятельности наблюдается на Средних Курильских о-вах в области очагов Средне-Курильских, Симуширских землетрясений 15.XI.2006 г., $M = 8.1$ и 13.I.2007 г., $M = 8.0$, участок 7 (см. рис. 1, 2).

Сведения о развитии сейсмичности и дополнения к долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курило-Камчатской дуги (ДССП), приведенные в Разделе 2, а также данные других методов сейсмического прогноза будут рассматриваться при развитии метода ДССП и составлении прогнозов на следующие интервалы времени.

Далее приводятся основные сведения о практическом применении метода ДССП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ВЫВОДЫ ПРОГНОЗА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДССП в 1985–2016 гг.

Сейсмическая защита Камчатки и Курильских островов, в районе наивысшего в России уровня сейсмичности и сейсмической опасности, является проблемой государственной важности. Этим определяется роль работ ИВиС ДВО РАН по методу долгосрочного сейсмического прогноза, как одной из наиболее важных работ РАН на Дальнем Востоке России.

В предыдущие годы долгосрочные сейсмические прогнозы, основанные на применяемом методе ДССП, выделение наиболее опасных мест региона и предупреждение о полной необходимости проведения заблаговременных мер по сейсмозащите и сейсмоукреплению в них послужили основанием Распоряжений и Постановлений Совета Министров СССР (1986 и 1989 гг.), Совета Министров РСФСР (1987 г.) и Правительства Российской Федерации (1995 и 2001 гг.) и ряда государственных решений 2002–2016 гг. о подготовке Камчатской области, края, к сильным землетрясениям [Федотов, 2005; Федотов и др., 2008; Федотов, Соломатин, 2015; и др.].

По данным ДССП на IV 2016 – III 2021 гг., наивысшая сейсмическая опасность землетрясений с $M \geq 7.7$ по-прежнему сохраняется в районе г. Петропавловск-Камчатский. Здесь в Авачинском заливе и у берегов Южной Камчатки находится самая большая сейсмическая брешь Курило-Камчатской дуги длиной 350 км, в которой возможно землетрясение с $M \geq 8.3$. В целом вероятность возникновения сотрясений силой 7–9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский в эти годы достигает 43.7%.

Вероятность того, что сильнейшее землетрясение произойдет в прибрежной части Авачинского

залива и будет иметь силу 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский и катастрофические последствия, по полученным оценкам равна 12.8%. Вероятность возникновения здесь землетрясений 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 30.9%.

Вторым по уровню сейсмической опасности на IV 2016 – III 2021 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.XI.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 29.7%.

Дополнительные данные получены при рассмотрении изолиний сейсмической активности A_{10} , роев землетрясений и других особенностей сейсмичности Курило-Камчатской дуги, наблюдавшихся в 2013–2016 гг. после периода глубоких сильнейших землетрясений под Охотским морем 2008–2013 гг. Эти и другие данные подтверждают прогнозы самой высокой сейсмической опасности для района г. Петропавловск-Камчатский. Она может быть здесь больше той, которая рассчитана для него по основной методике.

На основе полученных данных в полной мере сохраняется необходимость неотложных мер по сейсмотехнической безопасности, повышению устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в Камчатском крае. Работы по сейсмоукреплению и новому сейсмостойкому строительству в г. Петропавловск-Камчатский должны продолжаться и расширяться в 2016 и последующих годах.

Необходимы дальнейшее продолжение работ по данному методу долгосрочного сейсмического прогноза, исследования хода и закономерностей сейсмичности Курило-Камчатской дуги, развитие и совершенствование метода ДССП, его совместное применение с данными других методов сейсмического прогноза, а также сравнительные исследования природы и механизма сейсмической деятельности в Курило-Камчатском и прилегающих регионах.

Необходимо вести усиленные наблюдения за сейсмичностью в Авачинском заливе в районе г. Петропавловск-Камчатский, наиболее вероятном месте очага следующего в регионе 9-ти балльного землетрясения. В целом Южная Камчатка

и Авачинский залив относятся к числу первых мест в России, в которых необходимо продолжение работ по долгосрочному сейсмическому прогнозу, другим методам сейсмического прогноза и оценке сейсмического риска.

Полученные долгосрочные сейсмические прогнозы являются одновременно прогнозами опасных цунами на побережье Камчатки и Курильских о-вов. Возможно применение метода в других регионах мира со сходными строением, геодинамикой и сейсмичностью.

Практическая важность работ по ДССП предыдущего периода, перспективы их развития

С 1985 г. долгосрочные сейсмические прогнозы для Курило-Камчатской дуги являются основанием государственных мер по сейсмоукреплению в регионе. Данные этих прогнозов послужили обоснованием более десяти распоряжений и постановлений Совета Министров СССР, РСФСР, а также Правительства Российской Федерации 1986–2015 гг. о подготовке Камчатской области (края) к сильным землетрясениям [Федотов, 2005; Федотов, Соломатин, 2015; и др.].

На основании сделанных прогнозов и предупреждений в г. Петропавловск-Камчатский в 1990–2004 гг. было проведено сейсмоусиление 144 домов, имевших дефицит сейсмобезопасности 2–3 балла. В этих домах получили защиту 20 тысяч их жильцов, около 1/10 части населения города.

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

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

К настоящему времени указанные мероприятия, научным обоснованием которых стали данные долгосрочных сейсмических прогнозов, позволили предотвратить ущерб в общей сложности более 400 млрд рублей, и 75% жилых домов г. Петропавловск-Камчатский уже имеют необходимую прочность. Однако сильнейшее землетрясение в районе

г. Петропавловск-Камчатский до сих пор угрожает стать самым тяжелым стихийным бедствием в России. В таких условиях работы по сейсмоукреплению и новому сейсмостойкому строительству в г. Петропавловск-Камчатский должны в возможно большей мере расширяться в последующие годы.

На протяжении трех десятилетий, 1985–2016 гг., работы по долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги служат обоснованием мер по обеспечению сейсмобезопасности в Камчатском крае и относятся к наиболее важным работам РАН на Дальнем Востоке России.

Приведенный долгосрочный сейсмический прогноз землетрясений с $M \geq 7.7$ для Курило-Камчатской дуги на IV 2016 – III 2021 гг. может использоваться, как это делалось с предыдущими прогнозами 1985–2015 гг., для обоснования государственных мер по сейсмозащите и сейсмоукреплению.

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 по данному методу и выдвигали необходимые предложения о предотвращении катастрофических ущерба и потерь.

Исследования велись по Программе фундаментальных исследований ДВО РАН “Дальний Восток”, проект № 15-И-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

- Ризниченко Ю. В.* Сейсмическая активность и сотрясаемость // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 112–120.
- Рогожин Е. А., Иогансон Л. И., Завьялов А. Д.* Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реального сейсмического прогноза: к 65-летию Е. А. Рогожина. ISBN 978-5-904393-06-9. М.: Светоч Плюс, 2011. 368 с. (http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1779655).

- Салтыков В. А., Кравченко Н. М.* Параметры сейсмичности Камчатки в 2007–2008 гг. // Вторая региональная научно-техническая конференция “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. 11–17 октября 2009 г., Петропавловск-Камчатский. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2009. С. 41.
- Салтыков В. А., Кравченко Н. М.* Параметры сейсмичности Камчатки в 2009–2010 гг. // Третья региональная научно-техническая конференция “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. 9–15 октября 2011 г., Петропавловск-Камчатский. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2011. С. 134–138. http://www.emsd.ru/files/konf111009/pdf/sb/Sekciya_Monitoring/Saltyikow.pdf.
- Салтыков В. А., Кравченко Н. М., Волович О. Г. и др.* Параметры сейсмичности Камчатки в 2011–2012 гг. // Четвертая научно-техническая конференция “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. 29 сентября – 5 октября 2013 г., Петропавловск-Камчатский. Сборник трудов. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2013. С. 190–194. http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Saltikov_etc.pdf.
- Сафонов Д. А., Коновалов А. В., Злобин Т. К.* Урупская серия землетрясений 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2015. № 6. С. 60–70.
- Сильные камчатские землетрясения 1971 года / Отв. ред. С. А. Федотов. Владивосток: Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР, 1975. 156 с.
- Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В. Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. 252 с.
- 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 // Труды Института 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., 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.
- 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. 3–27.
- 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., Чернышева Г. В., Викулин А. В.* Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7^{3/4}$ свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. 1980. № 6. С. 52–67.
- Чебров В. Н., Викулина С. А., Дрознина С. Я. и др.* Сильные землетрясения на Камчатке в 2013 году // Четвертая научно-техническая конференция “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. 29 сентября – 5 октября 2013 г., Петропавловск-Камчатский. Сборник трудов. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2013. С. 132–136. http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Chebrov_etc.pdf.
- Чебров В. Н., Кугаенко Ю. А., Абубакиров И. Р., Дрознина С. Я. и др.* Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ (Камчатка) //

- Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 5–16.
- Юнга С.Л., Рогожин Е.А., Родина С.Н. Алгоритм и методика анализа механизмов глубокофокусных очагов для выявления зон подготовки сильных землетрясений Курило-Камчатского региона // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 3. С. 31–43.
- Юнга С.Л., Рогожин Е.А., Родина С.Н. Алгоритм и методика анализа механизмов глубокофокусных очагов для выявления зон подготовки сильных землетрясений Курило-Камчатского 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: Могои К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.).