

**ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ (ДССП)  
ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА VI 2019–V 2024 гг.;  
СВОЙСТВА ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЙ СЕЙСМИЧНОСТИ  
В I 2017–V 2019 гг.  
РАЗВИТИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДССП**

© 2019 г. **С. А. Федотов**<sup>1, 2</sup>, **А. В. Соломатин**<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9*

<sup>2</sup> *Институт физики Земли РАН  
123242 Москва, Большая Грузинская ул., 10, стр. 1*

*\*e-mail: alf55@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.03.2019 г.

Представлены результаты продолжающихся работ по методу долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) для Курило-Камчатской дуги, основанному на закономерностях сейсмических брешей и сейсмического цикла. Отмечены важнейшие направления развития метода ДССП в предыдущее десятилетие. Дан долгосрочный прогноз по основной методике на следующие 5 лет, VI 2019–V 2024 гг., для наиболее активной части сейсмогенной зоны региона. Для 20 ее участков на следующее пятилетие 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  $M \geq 7.7$ . В продолжение известных работ С.А. Федотова рассмотрены пространственно-временные особенности регионального сейсмического процесса в период с 2017 г., включающие сильнейшее Ближне-Алеутское землетрясение 17.VII 2017 г.,  $M = 7.7$ . Полученные результаты подтверждают тесную связь сейсмического процесса в наиболее сейсмически опасных, по данным ДССП, участках и крупнейших событий в самом регионе и прилегающих к нему сейсмоактивных областях, а также существующую в настоящее время очень высокую сейсмическую опасность в ряде районов Курило-Камчатской дуги и, соответственно, необходимость продолжения и неотложного увеличения проводимых работ по сейсмоукреплению и повышению уровня сейсмобезопасности в наиболее угрожаемых из них и, прежде всего, в административном центре Камчатского края – в г. Петропавловск-Камчатский.

**Ключевые слова:** сейсмичность Курило-Камчатской дуги, сейсмическая активность, сейсмическая опасность, сейсмический прогноз, сейсмические бреши, сейсмический цикл.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201966-22>

## ВВЕДЕНИЕ

Курило-Камчатская дуга, Курильские о-ва и Восточная Камчатка являются наиболее сейсмичными районами России, в которых опасность сильных землетрясений является проблемой государственной важности. Существенная роль в решении проблемы снижения сейсмического риска в регионе принадлежит регулярным работам Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН по сейсмическому прогнозу, в том числе и многолетним, ведущимся с 1965 г., работам по долгосрочному сейсмическому прогнозу для Курило-Камчатской дуги (ДССП).

Основы метода долгосрочного сейсмического прогноза ДССП, используемые закономерности,

свойства сейсмичности и ее оцениваемые параметры, обоснование, а также способы составления прогнозов приведены в работах [Федотов, 1965, 1968, 2005; Федотов и др., 1980, 2004, 2015, 2017; и др.]. Ниже изложены самые основные определения, необходимые для понимания принципов построения и результатов прогноза по методу ДССП.

Для составления долгосрочных пятилетних сейсмических прогнозов используются данные о параметрах сейсмического процесса за предшествующие 5 лет. К основной группе таких параметров относятся [Федотов, 1968, 2005; Федотов, Соломатин, 2008; и др.]: параметр сейсмической активности  $A_{10}$  – нормированное

число землетрясений энергетического класса [Федотов, 1972]  $K_S = 10$ ,  $M = 3.6$ ; параметр  $D$  – относительная и нормированная величина сейсмической энергии, выделившейся в пределах исследуемой области; параметр  $A_{11}$ , аналогичный  $A_{10}$ , но определяемый на основе землетрясений средней силы ( $K_S \sim 11-12$ ,  $M \sim 4-5$ ).

Долгосрочные сейсмические прогнозы рассчитываются для наиболее активной части Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, находящейся под континентальным склоном глубоководной впадины. Здесь, в полосе шириной 100 км, происходит более 85% землетрясений региона с глубинами очагов 0–80 км. К этой же полосе относится и область потенциальных очагов практически всех следующих землетрясений, которые могут вызвать сотрясения силой более 7–8 баллов на Курильских о-вах и Восточном побережье Камчатки.

Указанная полоса на протяжении 2100 км, согласно методу ДССП, делится в среднем на 20 участков длиной от 100 до 200 км и шириной 50 или 100 км, сравнимых по размеру с очагами сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) землетрясений (рис. 1). Для них на следующий 5-летний период прогнозируется ряд характеристик сейсмичности, основными из которых являются: стадия сейсмического цикла, проходимая каждым участком; ожидаемый для них уровень параметра  $A_{10}$ ; магнитуды землетрясений средней силы, ожидаемых в них с вероятностями 0.8, 0.5 и 0.15; а также вероятности возникновения сильнейших землетрясений и максимальные ожидаемые магнитуды последних, и ряд других параметров [Федотов и др., 2017; и др.].

Статья имеет следующую структуру. В Разделе 1 приведен долгосрочный сейсмический прогноз на VI 2019–V 2024 гг. для Курило-Камчатской дуги, построенный по данным на май 2019 г. В Разделе 2 рассматриваются особенности сейсмичности за период I 2017–V 2019 гг., связанные с подготовкой и реализацией Ближне-Алеутского землетрясения 17.VII 2017 г.,  $M = 7.7$ , – крупнейшего события рассматриваемого в статье региона со времени глубокого Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г.,  $M = 8.3$ . В Разделе 3 представлены наиболее значимые результаты, полученные при развитии метода ДССП за последнее десятилетие. В Заключение приведены главные результаты долгосрочного сейсмического прогноза, результаты его уточнения; рассмотрены практическое значение и вопросы дальнейшего применения метода.

В работе использованы данные региональных каталогов КФ и СФ ЕГС РАН, а также каталог Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov/>).

## 1. ДОЛГОСРОЧНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ НА VI 2019–V 2024 гг. (ПО ДАННЫМ НА МАЙ 2019 г.)<sup>1</sup>

Данный долгосрочный сейсмический прогноз на основе метода ДССП составлен на следующие 5 лет для наиболее активной части сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги, имеющей протяженность 2000 км, ширину 100 км и глубину очагов землетрясений  $H \leq 80$  км, разделенной на 20 прогнозных участков (см. рис. 1).

Основные результаты прогноза на VI 2019–V 2024 гг. по всем участкам Курильских островов и Камчатки заключаются в следующем.

Наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.7$  и глубиной очагов  $H \leq 80$  км в указанный пятилетний период остаются участки, расположенные в районе г. Петропавловск-Камчатский и Южной Камчатки:

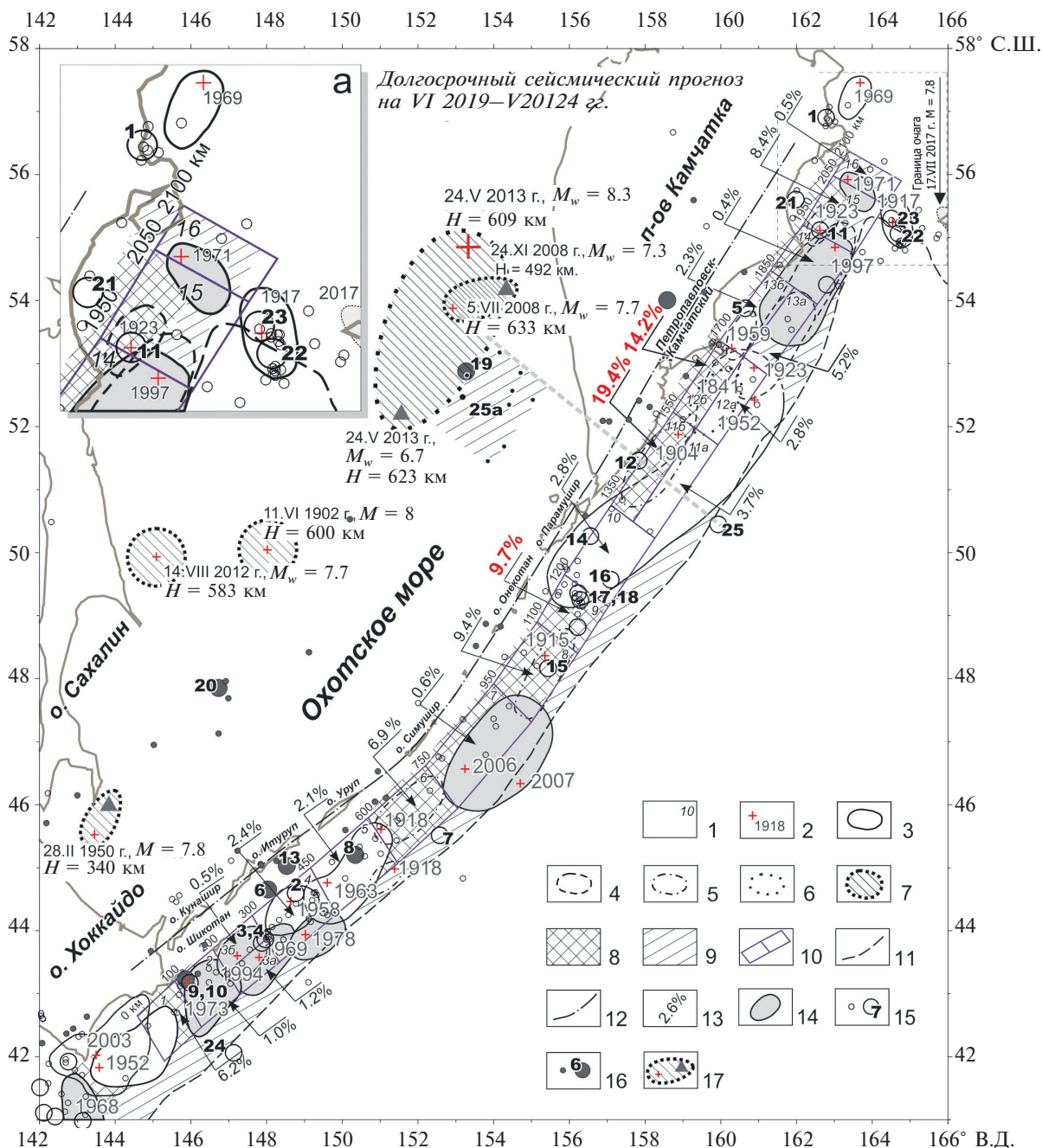
- для Южной Камчатки (участок 11б, см. рис. 1) вероятность землетрясения с  $M \geq 7.7$ ,  $P(M \geq 7.7)$ , имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 19.4%;
- для Авачинского залива (участок 12б, см. рис. 1) вероятность землетрясения  $M \geq 7.7$  на VI 2019 – V 2024 гг., имеющего силу до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, – 14.2%.

Землетрясения, имеющие силу 7–8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, с меньшей вероятностью 14.1% 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, таким образом, может достигать 47.7% в период времени VI 2019–V 2024 гг. (см. табл. 1). При этом вероятность возникновения в этот период времени в г. Петропавловск-Камчатский землетрясения силой 9 баллов равняется 14.2%, а землетрясений силой 8 и 7 баллов – 33.5%. Опасность землетрясений силой 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский в этот период в 4 раза больше их средней долговременной опасности в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне, которая является наибольшей в сейсмичных областях РФ.

По предшествующему прогнозу, данному на XI 2018–X 2023 гг., вероятности землетрясений в г. Петропавловск-Камчатский силой 7–9, 9 и 7–8 баллов равнялись 49.5%, 15.0% и 34.5%, соответственно. Таким образом, сейсмическая

<sup>1</sup> Зарегистрирован 20.VI.2019 г. в Совете ИВиС ДВО РАН и КФ ЕГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов.



**Рис. 1.** Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов курило-камчатских землетрясений 1902–2019 гг. с  $M \geq 7.7$  и вероятностей возникновения неглубоких ( $H < 80$  км) таких землетрясений в VI 2019–V 2024 гг. во всех участках полосы прогноза.

1 – номера участков; 2 – инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с  $M \geq 7.7$ ; 3 – границы очагов землетрясений с  $M \geq 7.7$ , проведенные с точностью 10 км; 4 – участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 5 – вероятные области очагов землетрясений 1904–1918 гг. с  $M \geq 7.7$ ; 6 – предполагаемая область очага 1841 г.; 7 – предполагаемые области очагов глубоких землетрясений 2008 и 2012 гг.; 8 – наиболее вероятные места следующих землетрясений с  $M \geq 7.7$ ; 9 – возможные места следующих таких землетрясений; 10 – границы участков прогноза; 11 – оси глубоководных желобов; 12 – ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 13 – вероятности землетрясений  $M \geq 7.7$  в VI 2019 – V 2024 гг. (см. табл. 1); 14 – области очагов землетрясений с  $M \geq 7.7$ , которые произошли после 1965 г. в предсказанных сейсмических брешах; 15 – эпицентры неглубоких землетрясений, произошедших в период V 2014 г.–V 2019 гг., меньший кружок, соответствует  $M = 5.0$ – $5.9$ , больший –  $M = 6.0$ – $7.3$  (цифра соответствует номеру землетрясения в табл. 2),  $H < 80$  км; 16 – то же с  $H \geq 80$  км; 17 – эпицентры и предположительные области очагов глубоких ( $H > 300$  км) сильнейших землетрясений, треугольники – положение их главных афтершоков. Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с  $M \geq 7.7$  в одном месте в течение 5 лет равна 3.6–4.2%.

опасность для г. Петропавловск-Камчатский по-прежнему находится на очень высоком уровне.

Сохраняется повышенная сейсмическая опасность и в районе залива Камчатский (участок 15, см. рис. 1, табл. 1). Вероятность сильнейшего землетрясения в данном районе на следующие 5 лет оценивается величиной 8.4%, в настоящее время это 5-й по степени опасности участок Курило-Камчатской сейсмогенной зоны.

На Курильских островах наиболее высокая сейсмическая опасность в районе Средних Курильских о-вов (6, 8 и 9 участки, см. рис. 1, табл. 1), вблизи концов главного разрыва Средне-Курильского, Симуширского землетрясения 15.IX.2006 г.,  $M = 8.2$  [Федотов и др., 2007, 2008, 2011; и др.], участки 6, 8 и 9 (см. рис. 1). Значения вероятности сильнейшего землетрясения в этих сейсмических брешах на период VI 2019–V 2024 гг. оцениваются величинами 6.9, 9.4 и 9.7%, соответственно. В участках 6 и 9 наблюдалась наиболее значительная активизация, определившая рост относительной сейсмической опасности сейсмической брешы, охватывающей 6–9 участки, с 23.0 до 26.6%. Этот рост продолжил тенденцию, отмеченную в предыдущем прогнозе. В целом, обширная сейсмическая брешь, охватывающая 6–9 участки, по-прежнему является 2-й по степени опасности сильнейшего землетрясения (26.7% против 47.7%) на следующий пятилетний период.

Важно отметить, что в последнее пятилетие в разной степени рост сейсмической активности наблюдался именно в выделенных сейсмических брешах, в том числе, в наибольшей степени также в участках 1, 11б, 12б и 13а. Это указывает на общую активизацию сейсмического процесса в наиболее опасных участках сейсмогенной зоны.

Участок 10 на Северных Курильских островах находится между двумя крупнейшими опасными сейсмическими брешами (см. рис. 1), и по-прежнему характеризуется высокой сейсмической активностью. Возможно, что значительная его часть также окажется в области очага следующего сильнейшего землетрясения.

Вероятность сильнейшего землетрясения в участке 1 (м. Сириха – п-ов Немуро) на следующие 5 лет оценивается величиной 6.2 % (см. табл. 1) и этот участок является 6–7-м по степени сейсмической опасности во всей Курило-Камчатской дуге.

В остальных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность возникновения сильнейших землетрясений  $P(M \geq 7.7)$  равна средней или существенно, до 10 раз, ниже средней пятилетней, равной 3.6–4.2%.

Полученные результаты являются одновременно прогнозами опасных цунами на побережье Камчатки и Курильских о-вов. Возможно

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

## 2. РАЗВИТИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ В ПЕРИОД I 2017–V 2019 гг.

Метод ДССП основан на важных предположениях об однородности в первом приближении сейсмического процесса во всей Курило-Камчатской дуге в долговременном плане и о локальных отклонениях уровня сейсмичности от среднего в процессе подготовки очагов сильнейших землетрясений в сейсмических брешах.

Эти базовые положения, как показал более чем полувековой успешный опыт практического применения ДССП, в целом верны.

Важной и апробированной методикой краткосрочных оценок сейсмической опасности в рамках общего метода ДССП является применение локальных “сценариев” развития сейсмического процесса: сценарий форшоков и сценарий афтершоков [Федотов и др., 1993; Федотов, 2005]. В то же время, в работах [Федотов, Соломатин, 2015, 2017] была показана существенная взаимосвязь сейсмического процесса как в направлении простирания Курило-Камчатской дуги, так и в направлении субдукции. В последнем случае важно отметить работы [Моги, 1988; Захарова, Рогожин, 2005; Юнга и др., 2011]. Также, в работе [Федотов, Соломатин, 2015] при изучении сейсмичности Курило-Камчатского региона было показано заметное влияние удаленного события прилегающего региона – Северо-Восточной Японии: подготовка и реализация гигантского землетрясения Тохоку 11.III.2011 г.,  $M = 9$ , отражалась в синхронной активизации в области Авачинского залива, Камчатка.

Таким образом, дальнейшее развитие важнейшей методики краткосрочно-среднесрочных оценок сейсмической опасности, в том числе и на основе метода ДССП, требует учета пространственно-временной структуры сейсмичности, которая связана с особенностями сейсмогеодинамики изучаемого региона. Первым шагом в этом направлении является развитие методики сейсмического мониторинга, включающего представление о взаимосвязи сейсмического процесса в различных и удаленных участках сейсмогенной зоны и влиянии на него наиболее значимых событий.

В работах [Федотов, Соломатин, 2015, 2017] развитие сейсмического процесса Курило-Камчатской дуги в период 2008–2016 гг. изучалось в связи с уникальной серией сильнейших землетрясений региона и прилегающих областей, а именно – сильнейших

**Таблица 1.** Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на VI 2019—V 2024 гг. ( $H < 80$  км), полученный с использованием параметров  $A_{10}$ ,  $D$ ,  $A_{11}$

Участок	$\Delta$ , км	Район	Стадия цикла и ее оценка по 2014–2019 гг. (V 2014 г.–IV 2019 г.)					Прогноз на VI 2019—V 2024 гг.						Вероятная очередность			
			Стадия	$P_1 = P(A_{10})$	$P_2 = P(D)$	$P_{11} = P(A_{11})$	$B = (P_1 * P_2 * P_3)$	$A_{10}(P \sim 0.7)$		$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$	$M_{Max}$		$P(M \geq 7.7)\%$		
								$A_{10}$	$A_{10} \pm \sigma$						$6-2$	$(7.0)$	$6-7$
1	0–100	Мыс Сириха – п-ов Немуро	III	0.92	0.65	0.91	0.36	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.8	<b>6.2</b>	<b>(7.0)</b>	<b>6–7</b>	<b>(5–6)</b>
2	100–200	П-ов Немуро – о-в Зелёный	II					1.2	0.8–1.9	5.8	6.3	6.8		<b>1.0</b>	<b>(1.0)</b>		
3а	200–300	О-в Шикотан, Ю-В	II					1.2	0.8–1.9	5.7	6.2	6.7		<b>1.2</b>	<b>(1.1)</b>		
3б	200–300	О-в Шикотан, С-З	II					1.2	0.8–1.9	5.7	6.2	6.7		<b>0.5</b>	<b>(0.5)</b>		
4	300–450	О-в Итуруп	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		<b>2.4</b>	<b>(2.3)</b>		
5	450–600	Против Фриза – о-в Уруп	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		<b>2.1</b>	<b>(2.0)</b>		
6	600–750	Мыс Кастрикум – пр. Буссоль	III	0.81	0.93	0.70	0.53	1.2	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	<b>6.9</b>	<b>(5.7)</b>	<b>6–7</b>	<b>(7)</b>
7	750–950	О-в Симушир – пр. Крузенштерна	II					1.2	1.0–1.9	6.0	6.5	7.0		<b>0.6</b>	<b>(0.6)</b>		
8	950–1100	О-в Шиашкотан	III	0.95	0.45	0.85	0.36	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	8.0	<b>9.4</b>	<b>(10.3)</b>	<b>3–4</b>	<b>(3)</b>
9	1100–1200	О-в Онекотан – пр. 3-й Курильский	III	0.59	0.04	0.46	0.01	1.2–3	0.8–4.5	6.0	6.5	7.0	7.9	<b>9.7</b>	<b>(7.0)</b>	<b>3–4</b>	<b>(5–6)</b>
10	1200–1350	О-в Парамушир – мыс Лопатка	II					1.2	0.8–1.9	5.9	6.4	6.9		<b>2.8</b>	<b>(2.7)</b>		

Таблица 1. Окончание.

Участок	Δ, км	Район	Стадия цикла и ее оценка по 2014–2019 гг. (V 2014 г.–IV 2019 г.)					Прогноз на VI 2019–V 2024 гг.						Вероятная очередность		
			Стадия	$P_1 = P(A_{10})$	$P_2 = P(D)$	$P_{311} = P(A_{11})$	$B = (P_1 * P_2 * P_3)$	$A_{10}(P \sim 0.7)$		$P \sim 0.8$	$P \sim 0.5$	$P \sim 0.15$	$M_{MAX}$		$P(M \geq 7.7)\%$	
								$A_{10}$	$A_{10} \pm \sigma$						3.7	19.4
11а	1350–1550	Юг Камчатки, Ю-В	II						5.8	6.3	6.8			3.7	(3.6)	
11б	1350–1550	Юг Камчатки, С-З	III	0.73	0.06	0.23	0.01		6.0	6.5	7.0	8.0		19.4	(20.9)	1 (1)
12а	1550–1700	Зал. Авачинский – п-ов Шипунский, Ю-В	II						5.7	6.2	6.7			2.8	(2.7)	
12б	1550–1700	Зал. Авачинский – п-ов Шипунский, С-З	III	0.36	0.50	0.22	0.04		5.9	6.4	6.9	8.0		14.2	(15.0)	2 (2)
13а	1700–1850	Залив Кроноцкий, Ю-В	III	0.83	0.97	0.81	0.64		5.9	6.4	6.9	8.0		5.2	(5.0)	8 (8)
13б	1700–1850	Залив Кроноцкий, С-З	II						5.9	6.4	6.9			2.3	(2.3)	
14	1850–1950	П-ов Кроноцкий	II						5.8	6.3	6.8			0.4	(0.4)	
15	1950–2050	Зал. Камчатский	III	0.72	0.99	0.20	0.14		6.0	6.5	7.0	7.9		8.4	(9.3)	5 (4)
16	2050–2100	П-ов Камчатский	II						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		

Примечания. В таблице даны прогнозы восьми характеристик сейсмичности на VI 2019–V 2024 гг. для всех 20 участков Курило-Камчатской дуги. Указаны 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 стадии сейсмического цикла – сейсмические брекши.  $P_1, P_2, P_3$  – вероятности случайного достижения наблюдаемого в сейсмических брекшах пятилетнего уровня параметров  $A_{10}, D, A_{11}$ , соответственно, на II стадии сейсмического цикла. I-V – параметр, показывающий относительную опасность сейсмических брекшей;  $A_{10}$  – прогнозируемая на следующие пять лет сейсмическая активность; пятилетние прогнозы землетрясений с  $M = 5.7-7.0$ , ожидаемые с вероятностями  $P \sim 0.8, 0.5, 0.15$ ;  $M_{MAX}$  – максимальная возможная магнитуда ожидаемого землетрясения в выделенных сейсмических брекшах;  $P(M \geq 7.7)$  – прогнозируемые пятилетние вероятности сильнейших землетрясений (значения в скобках соответствуют их величинам на XI 2018–X 2023 гг.). Аналогично выделена очередность сейсмических брекшей по степени опасности, в том числе – по предыдущим оценкам (в скобках). Фигурными скобками показаны наиболее опасные районы – район г. Петропавловск-Камчатский и район Средних Курильских островов. Средняя вероятность возникновения Курило-Камчатских землетрясений с  $M \geq 7.7$  в одном месте в течение 5 лет равна 3.6–4.2%.

глубоких Охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг.,  $M = 7.7, 7.7, 8.3$  (см. рис. 1), и гигантского катастрофического землетрясения Тохоку 11.III.2011 г.,  $M = 9.1$ . На основе пространственно-временной диаграммы исследовались свойства сейсмичности региона как в области неглубоких ( $H < 80$  км) землетрясений в районе глубоководного желоба (0–100 км), так и в более глубокой части сейсмогенной зоны (100–200 км и более 200 км).

В настоящей статье рассмотрены пространственно-временные особенности регионального сейсмического процесса в период с 2017 г., включающий сильнейшее Ближне-Алеутское землетрясение 17.VII.2017 г.,  $M = 7.7$ , произошедшее в прилегающей к Курило-Камчатскому региону области Алеутской островной дуги (см. рис. 1). Основные свойства сейсмичности Алеутских островов, значимо отличающиеся от аналогичных для Курило-Камчатской дуги, рассмотрены в работах [Балакина, Москвина, 2008, 2009, 2010]. Вопросы строения и геодинамики района сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг рассмотрены в работах [Селиверстов, 1998, 2009].

В работах [Чебров и др., 2017; Лутиков и др., 2019] рассмотрены основные характеристики и особенности афтершокового процесса очага сильнейшего Ближне-Алеутского землетрясения. Показано, что его очаг имел вид узкой зоны протяженной около 400–500 км, а сейсмическая подвижка представляла собой практически чистый правосторонний сдвиг. В качестве необычно большой отмечена также длительность афтершокового процесса.

Указанные особенности Ближне-Алеутского землетрясения позволяют предположить, что его сравнительно небольшая энергия ( $M = 7.7$  по данным NEIC) далеко не в полной мере отражает масштаб связанных геодинамических процессов. Поэтому представляется возможным аналогично [Федотов, Соломатин, 2015, 2017] исследовать влияние этих процессов на сейсмический процесс Курило-Камчатской дуги.

Исследование проводится, как и в предыдущих указанных работах, на основе пространственно-временной развертки (рис. 2). Наиболее сильные курило-камчатские землетрясения периода I 2017–V 2019 г. представлены в табл. 2, а также отмечены на рис. 1 и 2.

Прежде всего, необходимо отметить, что Ближне-Алеутское землетрясение предвлялось значимой активизацией на продолжении оси Алеутской островной дуги в район юго-западной части побережья залива Озерной (см. рис. 1) на значительном, около 300 км, удалении от ближайшей границы будущего очага и на расстоянии 470 км от его эпицентра. Этот факт также отражает значительный масштаб сейсмогеоди-

намических процессов, связанных с указанным землетрясением.

Активизация у побережья залива Озерной началась с землетрясения 29.III.2017 г.,  $M = 6.6$ ,  $H = 17$  км (событие 1, см. рис. 1, табл. 2) и после наиболее активной фазы (4 землетрясения  $M = 5.0–5.4$  29–30.III.2017 г.) продолжалась существенно менее активно фактически до начала июня, включая аналогичные события 6–7.VI.2017 г. В целом, область активизации имела протяженность около 30 км с простиранием вдоль береговой линии.

Западнее от района активизации расположено окончание хребта Кумроч – северо-восточной части горной системы Восточный хребет длиной около 600 км. Структура хребта Кумроч объясняется поддвигом, характерным также и для всей горной системы Восточной Камчатки на позднем этапе ее формирования [Цуканов, Зинкевич, 1987].

Примерно в это же время, 20.IV–28.VI.2017 г., началась активизация в участках 2–5 (события 2–4, см. рис. 1, 2, табл. 2), с середины 2017 г. по начало 2018 г. захватившая также и 6 участок, на границе которого находится окончание разлома сильнейшего Симуширского землетрясения 2006 г.

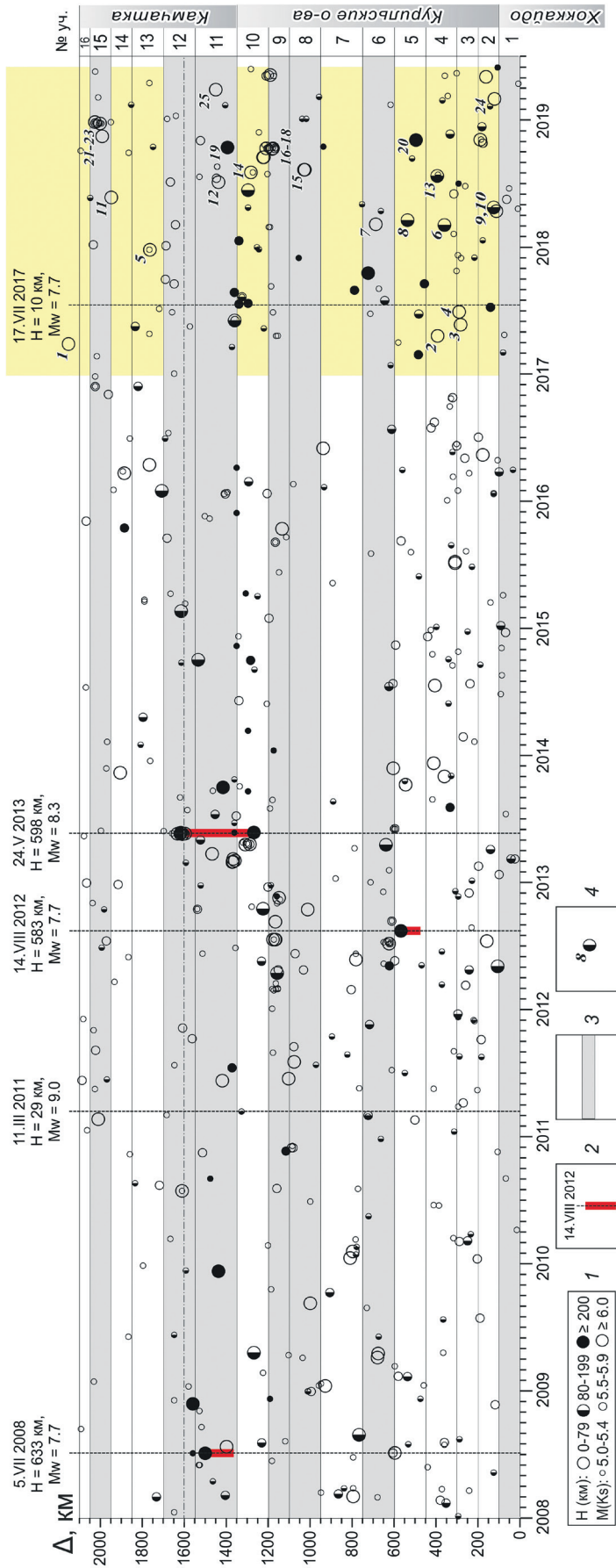
Отмеченная активизация по контрасту с предыдущей сейсмичностью в этом районе охватила диапазон промежуточных (события 6, 8, 10, 13) и глубоких землетрясений, наиболее значимым из которых является событие 20. Показательно, что это землетрясение произошло через очень малый, около 20 суток, промежуток времени после события 19, аналогично удаленного от глубоководного желоба и расположенного в очаге Охотоморского землетрясения (см. рис. 1, 2).

Среди неглубоких землетрясений, кроме событий 2–4 здесь выделяются события 7, 9, 24 (см. рис. 1, 2).

Примерно за 1.5 месяца до Ближне-Алеутского землетрясения в начале июня 2017 г. заметно активизировалась граница между 10 и 11 участками сейсмогенной зоны. Учитывая дополнительно почти годовое затишье в участках 9–11, можно считать также, что время указанной сейсмической активизации фактически совпадает со временем активизации в заливе Озерной (событие 1, см. рис. 1, табл. 2).

В дальнейшем зона активизации расширилась, охватив также значительную область, аналогичную области высокой сейсмической активности перед сильнейшим глубоким Охотоморским землетрясением 2013 г. (события 12, 14–19, 25 и более слабые, см. рис. 2). В целом все эти события относятся к юго-западному окончанию очага Камчатского землетрясения 1952 г.,  $M = 9$  (см. рис. 1).

К началу ноября 2018 г. уровень сейсмичности в участках 9–11 и 3–5 заметно снизился также практически одновременно, однако, в это



**Рис. 2.** Пространственно-временная развертка сейсмического процесса вдоль Курило-Камчатской островной дуги в I 2008—V 2019 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 в табл. 1.

1 — пространственно-временная проекция эпицентров наиболее сильных землетрясений, произошедших в период I 2008—V 2019 гг. с разбиением по интервалам глубин и магнитуд; 2 — то же для очагов сильнейших глубоких землетрясений 2008, 2012, 2013 гг., а также даты сильнейшего удаленного землетрясения Тохоку 2011 г. и Ближне-Алеутского землетрясения 2017 г.; 3 — сегменты проекций, соответствующих сейсмическим брешам в участках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны (см. рис. 1, табл. 1); 4 — нумерация землетрясений с  $K_s \geq 13.6$  в соответствии с табл. 2.



**Таблица 2.** Параметры характерных землетрясений Курило-Камчатской дуги в период I 2017–V 2019 г. с  $K_s \geq 13.6$  ( $M(K_s) \sim 6$  и выше)

№	Дата (гггг/мм/дд)	Время (чч:мм:сс)	°С.Ш.	°В.Д.	$H$ , км	$K_s$ (ЕГС РАН)	$M(K_s)$
1	2017/03/29	04:09:22	56.97	163.22	43	15.0	6.9
2	2017/04/20	11:41:26	44.40	148.90	76	14.0	6.3
3	2017/05/22	11:00:58	43.80	147.80	76	14.2	6.4
4	2017/06/28	12:07:32	43.70	148.00	70	13.8	6.1
5	2017/12/22	14:44:16	53.68	160.88	69	14.2	6.4
6	2018/03/04	19:52:52	44.80	148.00	123	13.8	6.1
7	2018/03/07	04:40:13	45.50	152.50	70	14.3	6.5
8	2018/03/18	18:00:13	45.20	150.30	103	14.3	6.5
9	2018/04/13	19:00:02	43.20	145.80	70	13.6	6.0
10	2018/04/24	08:53:22	43.30	145.80	92	14.9	6.9
11	2018/05/23	01:37:44	55.08	162.44	56	14.2	6.4
12	2018/07/06	01:40:03	51.32	158.13	75	14.9	6.9
13	2018/07/23	21:37:45	44.99	148.35	130	13.6	6.0
14	2018/08/02	21:58:00	50.24	156.60	78	13.7	6.1
15	2018/08/10	18:12:04	48.05	155.40	43	14.2	6.4
16	2018/09/15	15:40:14	49.58	156.69	69	14.1	6.3
17	2018/10/09	07:45:08	49.13	156.66	57	14.0	6.3
18	2018/10/10	23:16:02	49.09	157.26	41	14.6	6.6
19	2018/10/13	11:10:20	52.53	153.87	499	15.4	7.2
20	2018/11/02	11:01:16	47.83	146.70	433		$M_w = 6.0$
21	2018/11/14	21:21:49	55.53	162.41	75	15.0	6.9
22	2018/12/20	17:01:54	54.91	164.71	54	16.1	$M_w = 7.3$
23	2018/12/24	12:41:18	55.25	164.46	51	14.6	6.7
24	2018/03/02	03:22:55	42.01	147.05	50	14.2	6.4
25	2019/03/28	22:06:48	50.51	160.07	49	14.0	6.3
25a	21.III–26.V 2019 г.		51.5–53.2	153.2–155.2	418–537	9.2–11.1	3.1–4.3

Примечание.  $M(K_s)$  – магнитуда, полученная на основе данных об энергетическом классе ФИЦ ЕГС РАН в соответствии с соотношением  $K_s = 1.5 M + 4.6$  [Федотов, 1972].

же время, в районе стыка Курило-Камчатского и Алеутского желобов, в том числе в участке 15 уровень сейсмичности существенно возрос (события 21–23). При этом наиболее мощная активизация с максимальным событием 20.XII.2018 г.,  $M_w = 7.3$  (событие 22) наблюдалась в границах очага сильнейшего землетрясения 1917 г. (см. рис. 1). К июню 2019 г. эта активизация существенно ослабла, хотя и проявлялась по последним использованным данным землетрясениями с  $K_s \sim 12$  (20.IV.2019,  $K_s = 11.8$ ; 5.VI.2019,  $K_s = 12.4$ ).

Менее очевидна, хотя и характерна для наблюдаемого развития сейсмического процесса, закономерность, связанная с событиями 12 и 25.

Первое из них, землетрясение 6.VII.2018 г.,  $M(K_s) = 6.9$  ( $M = 6.1$  по NEIC) имело отклик  $M = 5.2$  в районе Шипунского п-ва, участок 12б, что указывает на значительный масштаб связанных с событием 12 геодинамических процессов.

Эпицентр землетрясения 28.III.2019 г.,  $M(K_s) = 6.3$  ( $M = 6.2$  по NEIC),  $H = 49$  км (событие 25) находится в районе Южной Камчатки на продолжении линии (см. рис. 1) в направлении тектонического поддвига и условно соединяющей эпицентр глубокого сильнейшего землетрясения 5.VII.2008 г. с эпицентром землетрясения 6.VII.2018 г. (событие 12)<sup>2</sup>.

Землетрясение 28.III.2019 г. явилось началом длительной локальной сейсмической активизации в районе глубоководного желоба, продолжавшейся и в июне 2019 г. условно симметричной активизации в очаге землетрясения 1917 г. (события 22, 23 и др., см. рис. 1).

Одновременно, 21.III–26.V.2019 г. юго-западнее от указанной линии между Западным побережьем Камчатки и очагом Охотоморского землетрясения 2013 г. также наблюдалась слабое, но заметное повышение сейсмической активности, определяемое 8 землетрясениями  $K_s = 9.2–11.1$  (событие 25а). Прежде подобная активизация (10 землетрясений с  $K_s = 9.6–11.8$ ) в этом районе наблюдалась 21.V–12.IX.2017 г. – при подготовке и сразу после реализации Ближне-Алеутского землетрясения. При этом максимальное событие с  $K_s = 11.8$  произошло 20.VII.2017 г. через трое суток после него.

Выделенная линия, соединяющая события 12 и 25 с эпицентром землетрясения 2008 г., одно-

временно является юго-западной границей группы землетрясений промежуточной глубины, отмечаемых на рис. 1 вдоль Восточного побережья Камчатки от Кроноцкого полуострова.

В дополнение к сказанному выше можно отметить, что значимая активизация в районе юго-западной границы очага Камчатского землетрясения 1952 г., представленная событиями 16–18, а еще ранее – событиями перед глубоким Охотоморским землетрясением 24.V.2013 г. (см. рис. 2), в направлении рассматриваемой условной линии указывает также на границу очага последнего.

Можно предположить, что отмеченные выше закономерности в дальнейшем могут оказаться важными при уточнении сейсмической опасности наиболее вероятных в настоящее время мест следующего сильнейшего землетрясения по всей Курило-Камчатской дуги: участков 11 и 12 (см. Раздел 1). Однако, уже сейчас в случае подобных событий, происходящих в сейсмических брешах, для краткосрочных оценок сейсмической опасности применяется методика “сценарий форшоков”. В соответствии с ней 6 июля 2018 г. Советом ИВиС и КФ ФИЦ ЕГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов было объявлено о значительном повышении сейсмической опасности в районе г. Петропавловск-Камчатский в период 6–8 июля 2018 г.

Аналогичное предупреждение об опасности сильнейшего землетрясения с эпицентром в 15 участке давалось и после землетрясения с  $M = 6.0$  в Камчатском заливе 14.XI.2018 г. (событие 21).

Также на основе разрабатываемого обобщенного сценария форшоков давалось предупреждение о существенном повышении сейсмической опасности в районе о-ва Парамушир (10 участок, см. рис. 1) в конце ноября – начале декабря 2018 г.

Основные выводы из приведенного рассмотрения заключаются в следующем.

В целом, отмеченные выше особенности сейсмичности Камчатского участка Курило-Камчатской сейсмогенной зоны показывают существенное влияние на нее Ближне-Алеутского землетрясения, важного наряду с Охотоморскими землетрясениями 2008–2013 гг. и землетрясением Тохоку в Северо-Восточной Японии фактором, определяющим сейсмический процесс в последнее десятилетие.

Подготовка очага Ближне-Алеутского землетрясения отмечалась за 3.5 месяца до него активизацией на продолжении оси Алеутской дуги в 470 км от его эпицентра, а его очаг имеет значительную протяженность 400–500 км. Все это указывает на значительный масштаб

<sup>2</sup> Указанная линия не направлена строго по нормали к простирающему соответствующего участка сейсмогенной зоны, что можно отметить по рис. 2, где нормальность проекции, насколько это возможно, соблюдается. Тем не менее, здесь необходимо учесть значительную вариацию глубин, точность определения эпицентров землетрясений, а также вероятность достаточно большой ширины структур, вероятно, разломного характера, определяющих возможную связь неглубоких и глубоких событий.

связанных с этим землетрясением сейсмогеодинамических процессов, охватывающих не только стык Курило-Камчатской и Алеутской дуг, но и всю Курило-Камчатскую дугу в целом.

Наиболее очевидная зона влияния сопутствующих Ближне-Алеутскому землетрясению сеймотектонических процессов – зона стыка дуг: очаг землетрясения 1971 г., Олюторский и Камчатский заливы. В то же время, достаточно очевидно аналогичные усиления сейсмической активности в районе Южной Камчатки – Северных Курильских о-вов, а также в южной части Курило-Камчатской дуги.

Можно отметить определенную синхронность изменения сейсмичности вдоль всей Курило-Камчатской дуги, а также в направлении по нормали к ней – вдоль направления субдукции.

По характеру вариаций сейсмичности Курило-Камчатской дуги (см. рис. 2) можно выделить крупнейшие ее сегменты. Прежде всего, это сейсмогенная зона у побережья Камчатки начиная с залива Озерновский на севере, и продолжающаяся до южного окончания гигантского очага Камчатского землетрясения 1952 г. Затем – область очагов сильнейших Курильских землетрясений 1958–1994 гг. (см. рис. 1). Средняя же часть – участки 7–8, к которой относится область сильнейших Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг., со времени сильнейшего глубокого Охотоморского землетрясения 2013 г. является относительно спокойной.

Вероятно, можно выделить и сегменты меньшего масштаба, границы которых при существенных тектонических изменениях проявляются повышенной сейсмической активностью. В числе таких вероятных границ отмечены: линия, соединяющая очаг сильнейшего глубокого землетрясения 2008 г. в Охотском море с событиями у побережья Южной Камчатки – 12 и 25; и линия, соединяющая юго-западные границы очагов сильнейших землетрясений 1952 г. у Восточного побережья Камчатки и 2013 г. в Охотском море (см. рис. 1).

Как и перед Охотоморским землетрясением 2013 г. наибольшая активность к концу 2018 г. наблюдалась возле южной границы очага Камчатского землетрясения 1952 г.: на стыке 9 и 10 участков сейсмогенной зоны, а также в участке 11 (см. рис. 1, 2). Можно предположить, что вероятность сильнейшего землетрясения в указанном районе была в этот период максимальной, значительно выше той, что отмечена на основе базового метода ДССП в Разделе 1. В настоящее время активность в указанном районе существенно ниже и сейсмическая опасность, по-видимому, вернулась к указанному в Разделе 1 уровню.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДА ДССП, ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В 1985–2019 ГОДАХ

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.

Согласно данным, полученным в Разделе 1, на V 2019–VI 2024 гг. сохраняется наивысшая сейсмическая опасность землетрясений с  $M \geq 7.7$  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 47.7%. При этом 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 14.2%, что в 4 раза больше средней в сейсмогенной зоне дуги.

Эти результаты подтверждают необходимость сохранения и активизации неотложных мер по обеспечению сейсмобезопасности, повышения устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в наиболее угрожаемых районах Камчатского края, и, прежде всего, – в районе г. Петропавловск-Камчатский. Работы по сейсмоукреплению и новому сейсмостойкому строительству в г. Петропавловск-Камчатский должны продолжаться и расширяться в 2019 и последующих годах.

Отмеченные в Разделе 2 при рассмотрении вариаций сейсмического процесса Курило-Камчатской дуги закономерности указывают на существенное влияние на него сейсмогеодинамических процессов, связанных с Ближне-Алеутским землетрясением 17.VII.2017 г.,  $M = 7.7$ , а также на существование и развитие определенных сейсмогеодинамических структур региона. Предполагается, что изучение последних является как важным направлением развития методик оценок сейсмической опасности, так и основой перспективного направления развития метода ДССП.

В целом, можно выделить два основных направления развития метода ДССП, работы по которым ведутся уже более полувека со времени создания метода в 1965 г. [Федотов, 1965, 1968]:

1) развитие, уточнение и практическое использование базовых положений метода долгосрочного сейсмического прогноза и основанных на них методик краткосрочных оценок опасности сильнейших землетрясений – сценарии форшоков и афтершоков;

2) работы по расширению представлений метода ДССП, разработка новых методик изучения свойств сейсмического процесса.

В то время, как работы в рамках первого из указанных направлений позволяют получать важные в практическом плане пятилетние оценки сейсмической опасности, а также краткосрочные, на основе сильных предполагаемых форшоков, оценки ее изменений апробированными в течение десятилетий базовыми методами, то второе направление предполагает как развитие самих базовых методов, так и уточнение результатов прогноза на основе расширенных представлений о сейсмическом процессе.

Основные результаты в первом направлении, на основе развития базового метода ДССП, результаты применения метода в 1965–2004 гг., изложены в многочисленных работах, обобщение которых приведено в работе [Федотов, 2005].

Важнейшими из результатов этого направления, полученных позднее, являются:

- указание в 2005 г. сейсмической бреши возле о-ва Хонсю, впоследствии охваченной практически полностью очагом гигантского землетрясения Тохоку 11.III.2011 г.,  $M = 9$ . Важно отметить, что это землетрясение, в полном соответствии с методикой краткосрочного прогноза "сценарий форшоков" за двое суток предварилось форшоком с  $M = 7.3$  [Федотов и др., 2012];

- успешный прогноз Симуширского землетрясения 15.XI.2006 г.,  $M = 8.3$  [Федотов и др., 2007], подтвердивший важнейшее положение метода об однородности в первом приближении сейсмического процесса во всей Курило-Камчатской дуге. Этот прогноз был отмечен среди важнейших достижений РАН в области естественных наук за 2006 г.;

- подтверждение и уточнение в 2008 г. [Федотов и др., 2008] свойств сейсмического цикла – хода сейсмического процесса в очагах сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги в процессе их развития.

Расширение представлений метода ДССП, развиваемых в последнее десятилетие, охватывает самый широкий спектр направлений.

- Введение дополнительных параметров, определяющих сейсмический процесс, в частности, параметра  $A_{11}$  [Федотов и др., 2008]. Введение параметра  $A_{11}$ , определяющего свойства средней части энергетического диапазона  $K_s = 11-12$  ( $M = 4.3-4.9$ ), дало возможность,

с одной стороны, распространять метод на регионы, для которых каталоги ограничены указанными величинами, в частности – район Северо-Восточной Японии и о-ва Хоккайдо, а с другой – повысить надежность прогнозов ДССП для Курило-Камчатского региона.

- Использование представлений о ходе графика суммы выделившейся сейсмической энергии как для всей Курило-Камчатской дуги, так и для отдельных ее участков [Федотов и др., 2011]. Данная методика позволила заблаговременно предсказать время Кроноцкого землетрясения 5.XII.1997 г.,  $M = 7.8$ . Также на основе подобных графиков показано проявление квазициклических вариаций сейсмического процесса.

- Исследование направления развития сейсмического процесса, сопровождающего подготовку и реализацию сильнейших Камчатских землетрясений [Федотов и др., 2012]. Данное исследование показало, что для сильнейших землетрясений Камчатки преобладающим направлением развития последовательности: форшоки – основное событие – афтершоки, по видимому, является направление с севера на юг. Такое предположение позволяет уточнять прогноз места сильнейшего землетрясения при условии выделения форшоковых активизаций.

- Уточнение характеристик поля сейсмического воздействия землетрясений Курило-Камчатского региона [Соломатин, 2013а]. Данное исследование позволило существенно расширить диапазон эпицентральных расстояний и магнитуд землетрясений, для которых ожидаемое макросейсмическое воздействие в баллах определяется с достаточной точностью и без систематической ошибки.

- Уточнение закона повторяемости землетрясений на основе представления о балансе сейсмической энергии по энергетическим диапазонам [Соломатин, 2011]. Данное исследование направлено на уточнение методики определения параметров распределения землетрясений по их силе. При рассмотрении закона такого распределения в качестве отражения баланса энергии землетрясений различных энергетических уровней возможно получение существенно более точных оценок, в том числе для важнейшего в ДССП параметра –  $A_{10}$ .

- Изучение вопроса цикличности сейсмического процесса [Соломатин, 2014]. Цикличность сейсмического процесса является важным фактором сейсмического прогноза. Проведенное исследование показало, что эффективные периоды повторяемости сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги определяются в общем случае 17-летним циклом и его гармониками. Наряду с выделенным 50-летним циклом данное представление позволяет определять наиболее

сейсмически опасные периоды. Важно, что подобные циклы также характерны и для вулканической активности Камчатки. Характерно и то, что они могут несколько отличаться от соответствующих циклов внешнего воздействия, что указывает на активность сейсмогеодинамических процессов.

- Исследование пространственно-временных свойств сейсмического процесса [Соломатин, 2013б]. Данное направление работы позволило расширить и уточнить представления: о статистических свойствах сейсмичности, о двух ее основных типах, о характере взаимодействия землетрясений, сейсмических активизациях и сейсмических затишьях. Было сделано также предположение об определяющей роли в сейсмическом процессе развития его пространственных структур.

- Изучение связи сейсмического и вулканического процессов [Федотов и др., 2018]. Эта работа подтвердила связь сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона и прилегающих областей с уровнем активности Камчатских вулканов. Была показана также связь глубоких ( $H > 80$  км) землетрясений с дифференциальной активностью двух крупнейших групп вулканов Камчатки. Развитие этого направления позволяет расширить представления о сеймотектонике региона.

- Разработка метода мониторинга вариаций параметров сейсмического процесса на основе вероятностей их отклонений от базовых законов: закона Гутенберга-Рихтера для величин землетрясений и экспоненциального распределения — для промежутков времени между ними [Федотов и др., 2019а]. Это представление является дополнением к “естественным” представлениям хода сейсмичности в виде кумулятивных рядов — сумм энергии землетрясений со степенями 0,  $\frac{1}{2}$ , 1, и является, в определенной мере, аналогом вероятностного подхода к изучению сейсмического процесса. Важное практическое преимущество данного подхода — более четкое выделение сейсмических активизаций и, отчасти, — затиший.

- Работы по развитию методики “сценарий форшоков” на основе представления о форшоках, удаленных по времени [Федотов и др., 2019б]. Данное направление исследований, “обобщенный сценарий форшоков”, существенно связано с цикличностью сейсмического процесса. Было найдено, что сильнейшие Курило-Камчатские землетрясения, а также землетрясения прилегающих структур, предваряются форшоками около 1040 суток (2.85 года —  $1/6$  17-летнего цикла). Подобная, хотя и несколько отличающаяся, закономерность обнаружена также практически для всех остальных сейсмоактивных областей

Тихоокеанского кольца. Построенный обобщенный сценарий удаленных по времени форшоков включает в себя заблаговременную, 2-суточную форшоковую активизацию в соответствии с методикой “сценарий форшоков” и позволяет за счет учета ряда более ранних активизаций повысить как заблаговременность сейсмического прогноза, так и его эффективность.

- Исследование гипоцентрального поля землетрясений на основе анализа плоско-ориентированных кластеров [Кириухин и др., 2016, 2017, 2018]. Данное направление важно для определения связи гипоцентрального поля сейсмоактивной среды и ее геолого-тектонического строения в виде плоских сейсмогенных разломов предположительно активируемых глубинными флюидами. Такое представление позволяет концептуально объяснить многие эффекты сейсмичности: ее цикличность, влияние и взаимосвязь удаленных сильнейших, в том числе — глубоких, землетрясений, выявленную связь сейсмичности и вулканизма. В практическом плане оно позволяет также выделять относительно однородные структуры для изучения развития сейсмического процесса.

Указанные направления нуждаются как в дальнейших исследованиях, так и в обобщении совместно с базовыми представлениями метода ДССП. Такой подход в перспективе позволит объединить в одном методе надежность долгосрочных оценок сейсмической опасности с точностью краткосрочных оценок на основе непрерывного мониторинга сейсмичности. Развитие представлений метода ДССП, создание на их основе методик сейсмического мониторинга и краткосрочного сейсмического прогноза, позволяют также расширить возможности по согласованию полученных результатов с результатами других методов сейсмического прогноза, как долгосрочных, так и среднесрочно-краткосрочных.

Указанные выше работы в последнее десятилетие проводились в рамках Проектов ДВО РАН 12-1-П4-04, 15-1-2-035, 18-5-002, а также РФФ № 16-17-10008.

Как уже отмечалось ранее, практическое применение метода ДССП имеет важнейшее государственное значение для обеспечения сейсмобезопасности в Курило-Камчатском регионе. Данные долгосрочных сейсмических прогнозов явились важным обоснованием для принятия заблаговременных мер по сейсмобезопасности, сейсмозащите и сейсмоусилению. С 1986 г. на основании данных долгосрочных сейсмических прогнозов по апробированному методу ДССП ведется повышение сейсмостойкости домов прежней постройки. В 1986—2001 гг. было принято 6 соответствующих Решений и Постановлений Правительств СССР, РСФСР и РФ, в том числе

Постановление о Федеральной целевой программе “Сейсмобезопасность территории России” (2002–2010 годы).

В дальнейшем данные долгосрочных сейсмических прогнозов передавались Президиуму РАН, ОНЗ, ДВО и другим учреждениям РАН, МЧС РФ, губернаторам Камчатской области (края), Полномочному представителю Президента РФ по Дальневосточному федеральному округу.

В 2006 и 2007 гг. были даны три поручения Президента РФ В.В. Путина от 17.05.2006, 02.11.2006 и 22.09.2007 гг. по обеспечению сейсмобезопасности, проведению сейсмоусиления жилого фонда и объекту социальной сферы и выделению средств на эти цели из федерального бюджета.

По итогам этих обращений 22.09.2007 г. Председателем Правительства РФ В.А. Зубковым было дано распоряжение о срочной подготовке согласованного плана практических мероприятий по обеспечению сейсмобезопасности Камчатского края. 18.07.2008 г. издано Распоряжение Правительства РФ № 1197-р, в котором утверждена Концепция ФЦП “Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения Российской Федерации (2009–2013 годы)”.

После проведенного 25 сентября 2008 г. совещания в Петропавловске-Камчатском Президентом РФ Д.А. Медведевым 16.10.2008 г. был дан ряд Поручений о срочном выделении финансовых средств на мероприятия по повышению сейсмической устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в Камчатском крае.

В 2009 г. Правительство РФ поставило задачу финансирования Камчатского края и Сахалинской области для повышения устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в 2009–2013 гг. Пояснения по этим вопросам передавались в Президиум РАН, ДВО РАН, руководству Камчатского края и МЧС. Они были нужны для получения необходимых средств на сейсмоусиление и планирования мер по его осуществлению.

Вопросы финансирования были решены к лету 2009 г. и 30 июля 2009 г. Правительство РФ выделило значительные средства Камчатскому краю и Сахалинской области на повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в 2009–2013 гг. На реализацию федеральной целевой программы “Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2009–2013 годы”, введенными Постановлением Правительства РФ от 30.07.2009 № 615, было предусмотрено вы-

деление Камчатскому краю из общего финансирования 8 млрд 112.7 млн руб., и с конца 2010 г. были возобновлены интенсивные работы по обеспечению необходимого уровня сейсмобезопасности, сейсмоусилению жилых домов и новому сейсмостойкому строительству в краевом центре – г. Петропавловск-Камчатский.

В феврале 2013 г. Правительство Камчатского края приняло постановление от 25.02.2013 № 72-П о долгосрочной целевой программе “Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в Камчатском крае в 2013–2015 годах”, на реализацию которой выделено 4.3 млрд рублей.

С целью продолжения этих работ губернатор Камчатского края В.И. Илюхин с учетом данных ДССП обратился 13.01.2017 г. к Президенту РФ В.В. Путину с просьбой о выделении лимита Камчатскому краю для ликвидации дефицита сейсмостойкости. Президент РФ дал поручение Правительству РФ проработать этот вопрос.

В том же 2017 г. на основании данных ДССП от имени Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (РЭС) МЧС и РАН Заместителю Председателя Правительства РФ Д.Н. Козаку были направлены материалы и сведения о наивысшей в России сейсмической опасности в районе г. Петропавловск-Камчатский и необходимости многократного увеличения мер по заблаговременному предотвращению катастрофических последствий сильнейшего землетрясения в этом районе.

На 2019 г. на выполнение работ по обеспечению работ по сейсмобезопасности в Камчатском крае предполагается выделить 1 млрд 90 млн рублей. В то же время необходимая ежегодная сумма на эти работы должна быть кратно большей. Хотя к настоящему времени 75% жилого фонда г. Петропавловск-Камчатский имеют необходимую прочность, размеры возможных потерь от сильнейших землетрясений здесь до сих пор оцениваются катастрофическими величинами: повреждениями около 60% неукрепленных строений и числом пострадавших до 100 тысяч.

По оценкам, данным специалистами Правительства Камчатского края, на полное выполнение работ по сейсмоукреплению в Камчатском крае необходимы 200 млрд рублей для предотвращения грозящего ущерба размером 2 трлн 150 млрд рублей и катастрофических последствий. Такие вложения средств требуют ведения сопровождающих научных исследований. Должны продолжаться работы по долгосрочному сейсмическому прогнозу, дающие обоснование мер по сейсмоукреплению,

их государственному планированию и сопровождающие их выполнение.

Таковы практическая польза и значение работ по методу ДССП. Тем не менее, 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 исследование 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 и развитие работ также по другим методам сейсмического прогноза.

В последние годы меры по сейсмоусилению и сейсмоукреплению в Камчатском крае принимались при деятельном участии губернатора Камчатского края В.И. Илюхина и ранее – А.А. Кузьмицкого. Руководство РАН и ДВО РАН, и, прежде всего, академики Ю.С. Осипов, В.Е. Фортов, Н.П. Лаверов, В.И. Сергиенко и А.О. Глико неизменно поддерживали исследования и выдвигали необходимые предложения.

Определяющим фактором практических дел по обеспечению сейсдобезопасности уже на протяжении 40 лет являются работы Совета ИВиС ДВО и КФ ФИЦ ЕГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов Курило-Камчатского региона, ведущиеся с мая 1978 г. (Председатель Совета академик С.А. Федотов).

В течение 40 лет в Совете по прогнозу землетрясений и извержению вулканов ведутся непрерывное слежение за сейсмичностью и составление сейсмических прогнозов. В настоящее время в работе Совета принимают участие сотрудники ИВиС ДВО РАН, КФ ФИЦ ЕГС РАН, ИКИР ДВО РАН.

Важно отметить работы Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (РЭС МЧС и РАН) в области прогноза землетрясений, в том числе и его Камчатского филиала, а также поддержку Администрацией Камчатского края, РАН, ДВО РАН, МЧС усилий Совета по обоснованию необходимости государственных мер по обеспечению сейсдобезопасности в Камчатском крае и обоснованию работ по предотвращению катастрофического ущерба и потерь.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность всем участникам исследований по долгосрочному сейсмическому прогнозу, а также коллегам сейсмологам ТСЭ ИФЗ АН СССР, ИВ – ИВиС ДВО РАН, КОМСП – КФ ФИЦ ЕГС РАН, чьи данные использовались при составлении прогнозов в 1965–2019 гг.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования велись частично при поддержке Программы ДВО РАН Дальний Восток, Проект № 18-5-002.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балакина Л.М., Москвина А.Г.* Особенности сейсмогенного процесса в Алеутской островной дуге. Ч. I. Взаимоотношение очагов крупных землетрясений 1957 г., 1986 г., 1996 г. в архипелаге Андреяновских островов // *Физика Земли*. 2008. № 8. С. 32–62.
- Балакина Л.М., Москвина А.Г.* Особенности сейсмогенного процесса в Алеутской островной дуге. Ч. II. Крупнейшие землетрясения в архипелаге Крысьих островов 4.02.1965 г., 17.11.2003 г. // *Физика Земли*. 2009. № 3. С. 24–49.
- Балакина Л.М., Москвина А.Г.* Особенности сейсмогенного процесса в Алеутской островной дуге. Ч. III. Землетрясения в Западной и Восточной окраинах дуги // *Физика Земли*. 2010. № 4. С. 9–34.
- Захарова А.И., Рогожин Е.А.* Соотношение магнитуд сильных землетрясений с параметрами процессов их глубокофокусных форшоков // *Геофизические исследования*. 2005. № 2. С. 27–32.
- Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А.* Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг. // *Вулканология и сейсмология*. 2016. № 5. С. 3–20.
- Кирюхин А.В., Федотов С.А., Соломатин А.В., Кирюхин П.А.* Геомеханическая интерпретация сейсмичности на шельфе Камчатки: приложения для сейсмического прогноза и поиска углеводородов // *Геомодель* 2018. 20-я юбилейная конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. Геленджик, Россия, 10–14 сентября 2018 г.
- Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Донцова Г.Ю., Жуковец В.Н.* Землетрясение 17.07.2017 г.,  $M_w = 7.8$  вблизи Командорских островов и сильные сейсмические проявления в западном сегменте Алеутской островной дуги // *Вулканология и сейсмология*. 2019. № 2. С. 52–66.
- Моги К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.

- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг / Под ред. Н.И. Селиверстова. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 194 с.
- Соломатин А.В.* Построение уточненной модели уравнения макросейсмического поля для землетрясений Курило-Камчатского региона. Интерполяционный и регрессионный подходы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013а. № 1. Вып. 6. С. 30–42.
- Соломатин А.В.* Развитие теории и методологии долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги / Дисс. ... кандидата физико-математических наук. Петропавловск-Камчатский, 2013б. 175 с.
- Соломатин А.В.* Закон повторяемости землетрясений и энергетический баланс сейсмического процесса // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 4. С. 39–48.
- Соломатин А.В.* Исследование связи вулканической активности и сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 61–76.
- 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.
- 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.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2016–III 2021 гг., его развитие и применение; особенности сейсмичности Курило-Камчатской дуги до и после глубокого Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г.,  $M = 8.3$  // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 3–17.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Кирюхин А.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на XII 2017 – XII 2022 гг., связь сейсмичности и вулканической активности Камчатского сегмента дуги, влияние на их развитие сильнейших региональных землетрясений 2000–2017 гг. // Материалы XXI региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2018 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. С. 145–148.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Кирюхин А.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на III 2019–II 2024 гг.; развитие методики мониторинга сейсмического процесса // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28–29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019а. С. 132–135.
- Федотов С.А., Фирстов П.П., Соломатин А.В., Копылова Г.Н., Черных Е.В.* Общему Совету Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН по прогнозу землетрясений и извержений вулканов 40 лет (1978–2018 гг.) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28–29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019б. С. 171–174.
- 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. 3–22.
- 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.,  $M_s = 8.2$  // 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.,  $M_s = 8.2$ ; 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  $M \geq 7\frac{3}{4}$  свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. 1980. № 6. С. 52–67.
- Федотов С.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С.* Оценка сейсмической опасности землетрясений с  $M \geq 6$ , сопровождающих сильнейшие ( $M \geq 8$ ) тихоокеанские землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 3–12.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др.* Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с  $M_w = 7.8$  на границе Командорской сейсмической бреши // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. Вып. 35. № 3. С. 22–25.



Цуканов Н.В., Зинкевич В.П. Тектоника хребта Кум-роч (Восточная Камчатка) // Геотектоника. 1987. № 6. С. 63–77.

Юнга С.Л., Рогожин Е.А., Родина С.Н. Алгоритм и методика анализа механизмов глубокофокусных очагов для выявления зон подготовки сильных земле-

трясений Курило-Охотского региона // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 3. С. 31–43.

Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P., Voronin P. Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2017. V. 2017, Article ID 4279652. 21 p. doi:10.1155/2017/4279652.

## LONG-TERM SEISMIC FORECAST (LTSF) FOR THE KURIL-KAMCHATKA ARC VI 2019–V 2024; PROPERTIES OF PRECURSORY SEISMIC ACTIVITY IN I 2017–V 2019. DEVELOPMENT AND PRACTICAL APPLICATION OF THE LTSF METHOD

**S. A. Fedotov**<sup>1, 2</sup>, **A. V. Solomatin**<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, ul. B. Gruzinskaya, 10, str. 1, Moscow, 123242 Russia*

\*e-mail: [alf55@mail.ru](mailto:alf55@mail.ru)

Received March 19, 2019

The paper presents the results of the ongoing work on the method of the long-term seismic forecast (LTSF) for the Kuril-Kamchatka Arc. The method is based on seismic gaps and seismic cycle pattern's. The work also reveals the most important trends of the method development over the prior decade. Based on the main methodology the long-term forecast is given for the next 5 years from VI 2019 to V 2024 period, for the most active part of the region's seismogenic zone. The seismic cycle stages are predicted for the next five years, the normalized characteristic of the weak earthquakes ( $A_{10}$ ) amount, the earthquakes with the medium magnitudes expecting with the 0.8, 0.5 and 0.15 probabilities, the maximum expected magnitudes and the strongest with the  $M \geq 7.7$  earthquakes probabilities for 20 of its zones. The famous works of S.A. Fedotov resulted in further research of the regional seismic process's spatial and temporal features within the 2017 period, including the strongest ( $M = 7.7$ ) July 17, 2017 Near-Aleutian Earthquake. The results confirm close seismic process relation in the most seismically dangerous, according to the LTSF data zones and major events in the region itself and the adjacent seismic regions, as well as the current very high seismic hazard in some zones of the Kuril-Kamchatka Arc and the need to continue and increase the works being done for earthquake resistance and seismic safety in the most endangered zones and of course in administrative center of Kamchatka the Petropavlovsk-Kamchatskii city.

**Key words:** seismicity of the Kuril-Kamchatka Arc, seismic activity, seismic hazard, seismic forecast, seismic gaps, seismic cycle.