

**СИМУШИРСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 15 ноября 2006 г. (I)
и 13 января 2007 г. (II) с $M_w=8.3$ и $M_w=8.1$ (Средние Курилы)**

Е.А. Рогожин¹, В.И. Левина²

¹Институт физики Земли РАН, г. Москва, eurog@ifz.ru

²Геофизическая служба РАН, vlr.levina@gmail.com

В последние 6 лет были собраны разнообразные материалы, позволившие понять основные сейсмологические, геодинамические и сеймотектонические особенности очага сильнейшего ($M_w=8.3$) Симуширского-I землетрясения, произошедшего 15 ноября 2006 г. в 11^h14^m в центральной части Курильской островной дуги [1]. Эпицентр землетрясения располагался примерно в 100 км к востоку от Тихоокеанского побережья о. Симушир на приостровном склоне Курильской гряды. Землетрясение произошло в подводных условиях и породило волны цунами, распространившиеся по всей акватории Тихого океана. Этот толчок является весьма важным событием, поскольку случился в зоне, где, по данным долгосрочного сейсмического прогноза С.А. Федотова [2, 3], ожидалось землетрясение с $M>7.7$ (рис. 1).

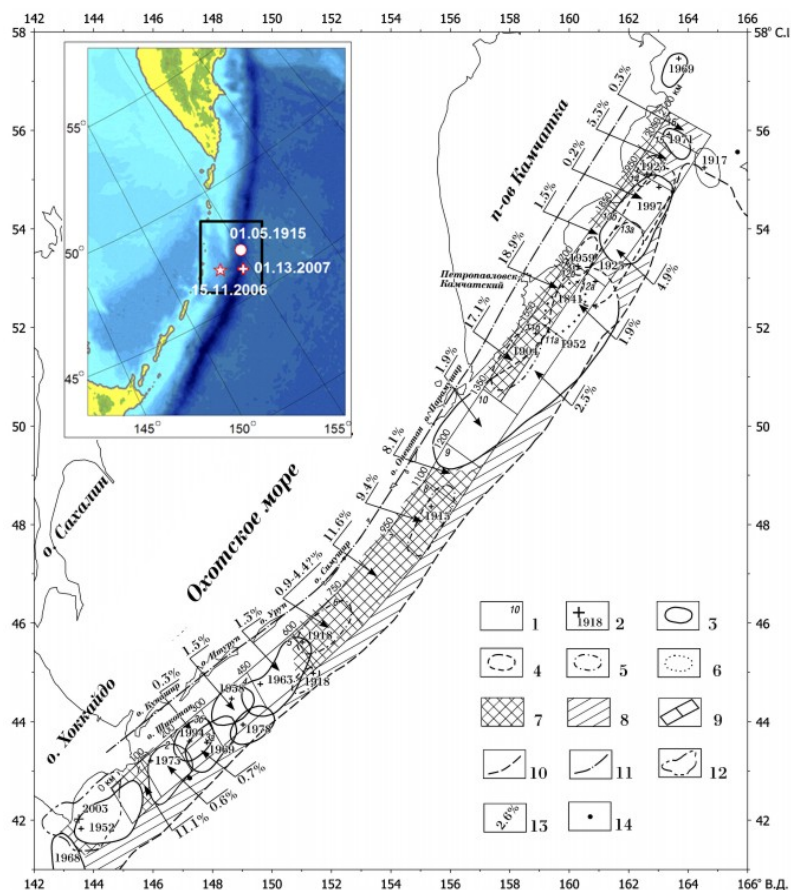


Рис. 1. Карта очагов Курило-Камчатских землетрясений за 1904–2003 гг. с $M \geq 7.7$, $h=0-80$ км и вероятность возникновения таких землетрясений в 2004–2008 гг. во всех участках полосы прогноза по [2, 3]

Выборочная расшифровка условных обозначений рис. 1 из [3]: 2 – инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 3, 4 – границы очагов землетрясений; 7, 8 – возможные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$. На врезке прямоугольником показано положение эпицентральной зоны Симуширских землетрясений, где кружком, звездочкой и крестом обозначены эпицентры землетрясений 1915, 2006 и 2007 гг. соответственно.

На протяжении всей истории инструментальных сейсмологических наблюдений до 2006 г. на Курилах, в центральной части островной дуги, сейсмических событий с $M > 7.5$ практически не происходило. Последнее землетрясение с $M = 7.9$ в этом районе было зафиксировано в 1915 г. [1] (рис. 1).

Спустя два месяца после Симуширского-I землетрясения, 13 января 2007 г., на центральном отрезке Курильской островной дуги произошло еще одно сильное ($M_w = 8.1$) – Симуширское-II – землетрясение [1], эпицентр которого располагался еще дальше от островной дуги, примерно в 100 км к юго-востоку. Эти два сильнейших землетрясения являются уникальными событиями в сейсмической истории Средних Курил.

Очаговая область обоих землетрясений была изучена с разных сторон. Проведен анализ телесеизмических данных, собранных мировой и российской национальными сетями сейсмических станций. Собраны немногочисленные данные эпицентральных наблюдений в ближней зоне очаговой области. В рамках этого направления осуществлялись сеймотектонические, сейсмологические, макросейсмические и геодезические исследования. Детальное изучение деформаций поверхности на суше с помощью геодезических наблюдений методом GPS является единственным источником информации о характере дислокаций, возникших в эпицентральной области подводных сильных сейсмических событий, какими являются описываемые землетрясения. Изучение афтершокового процесса с помощью сетей мировых и близлежащих региональных сейсмических станций дает представление о строении очага землетрясения на глубине и его проекции на поверхности. Макросейсмическое обследование эпицентральной зоны сейсмического события, включающее также сведения о проявлении цунами, позволяет понять закономерности распределения на поверхности сейсмических колебаний. На основании всех собранных данных делается попытка построить модель сейсмического очага этого парного сейсмического события с реконструкцией главных плоскостей подвижек, амплитуды и направлений импульсных смещений. Выясняется положение и строение сейсмогенерирующих структур.

Основные параметры землетрясений. Сводка определений параметров землетрясений, полученных из различных источников, приведена в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Источник
			φ° , N	$\delta\varphi$, км	λ° , E	$\delta\lambda$, км	h , км	δh , км		
15 ноября 2006 г.										
SKHL	11 14 15.4	0.67	46.67	2.3	153.23	3.9	37	1.9	$MLH=8.0/1$	[4]
MOS	11 14 14.50	0.99	46.571	5.9	153.29	3.4	26		$MPSP=6.7/113$, $MS=8.0/61$, $M_w=7.7$	[5]
ISC	11 14 14.54	0.35	46.68	3.15	153.21	1.65	12.2 29*	2.08 2*	$M_s=7.8/218$, $m_b=6.4/369$	[1]
NEIC	11 14 13.57	0.12	46.59	3.8	153.26	2.7	10f		$M_s=7.8/153$, $m_b=6.5/252$, $M_w=7.9$	[1]
GCMТ	11 14 17.80	0.1	46.71	1.1	154.33	1.1	13.5	0.5	$M_w=8.3/108$	[1]
JMA	11 14 09.60	3.0	46.7	23.6	154.05	15.6	30		$M=7.9$	[1]
IDC	11 14 11.40	0.31	46.61	10.9	153.42	7	0f		$MS=7.8/28$, $m_b=5.6/38$	[1]
EHB	11 14 13.80	1	46.6	21	153.26	12	10			[1]
13 января 2007 г.										
SKHL	04 23 23.35	1.45	46.15	8.9	154.45	7.3	45	5	$MLH=8.1/1$	[4]
MOS	04 23 25.20	1.04	46.214	6.7	154.51	4.1	54		$MS=8.2/71$, $MPSP=7.4/75$, $M_w=8.0$	[5]
ISC	04 23 23.25	0.08	46.23	2.58	154.50	1.4	23*	1*	$M_s=8.2/200$, $m_b=7.1/365$	[1]
NEIC	04 23 21.16	0.11	46.24	3.6	154.52	2.7	10f		$M_s=8.2/132$, $m_b=7.3/217$, $M_w=8.0$	[1]
GCMТ	04 23 21.20	0.1	46.17	2.22	154.8	1.1	12f		$M_w=8.1/102$	[1]
JMA	04 23 13.00	1	46.94	12.2	155.05	9.1	30		$M=8.2$	[1]
IDC	04 23 19.98	0.33	46.16	12.1	154.63	9.6	0f		$MS=8.0/34$, $m_b=5.9/33$	[1]
EHB	04 23 22.67	1.08	46.24	22	154.55	13	20f			[1]

Примечание. Символом «*» обозначено значение h по глубинной фазе pP , f – фиксированная глубина. Расшифровка кодов агентств дана в условных обозначениях к наст. сб.

Положения эпицентров (рис. 2) по определениям агентств SKHL, ISC, EHB, IDC, MOS и NEIC неплохо согласуются между собой, в то время как решения агентств JMA и GCMT удалены на значительное расстояние от остальных (до 90 км). Подобные расхождения вполне объяснимы, поскольку агентство GCMT дает положение центра тяжести центроида, а сеть сейсмических станций агентства JMA расположена к югу от очага и дает постоянный сдвиг в определении Курильских землетрясений.

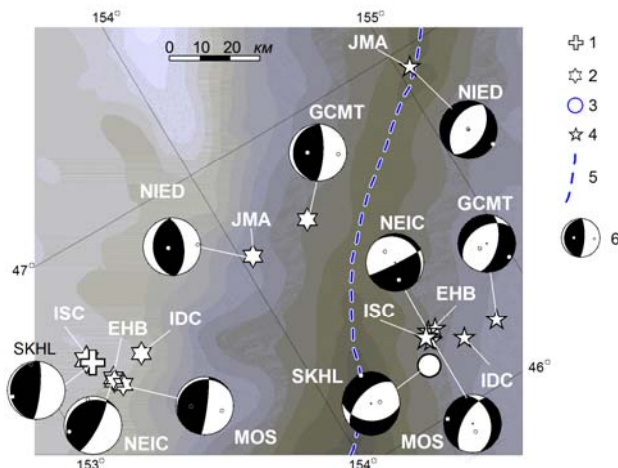


Рис. 2. Решение эпицентров Симуширских землетрясений по данным различных служб

1, 2 – эпицентры Симуширского-I землетрясения; 3, 4 – эпицентры Симуширского-II землетрясения; 5 – ось Курило-Камчатского глубоководного желоба.

ло несколько десятков глубокофокусных умеренных по силе сейсмических толчков, эпицентры которых охватывали обширную территорию в задуговом бассейне. Согласно решению фокального механизма их очагов, оси максимального сжатия были близгоризонтальны и направлены к юго-востоку и к востоку, на среднюю часть Курильской дуги, в область готовящегося Симуширского-I землетрясения наподобие лопастей веера, открытого к северо-западу. Продолжение осей сжатия перекрещивались в его будущей эпицентральной области [7, 8]. Согласно предложенному К.М. Моги [9] методу выявления глубокофокусных удаленных форшоков сильных землетрясений, именно в этом месте можно было ожидать возникновение сильного землетрясения (рис. 3).

В течение 2006 г. сейсмическая активность на Средних Курилах постепенно нарастала. На рис. 4 представлена карта эпицентров землетрясений из района будущих сильных землетрясений, а также график изменения ежесуточных чисел землетрясений и суммарной сейсмической энергии, высвобожденной в процессе формирования очагов в районе Средних Курил по данным каталога ISC [1].¹ Менее чем за два месяца до Симуширского-I землетрясения в его очаговой зоне произошла серия мелкофокусных форшоков, которая началась 26 сентября и продолжалась до 7 октября. За это время в области очага будущего землетрясения произошло около 150 землетрясений с магнитудой $M=3.5-6.6$. Простираение наиболее плотной части облака форшоков совпадает с направлением Курило-Камчатского глубоководного желоба, а глубина землетрясений не превышает 70 км (рис. 4 а, б). За три недели до главного толчка на всей Курило-Камчатской и Командорской островных дугах в течение десяти дней наблюдалось сейсмическое затишье, когда не возникало фоновых землетрясений с $M \geq 4$. Затем 8 ноября началась новая форшоковая активизация, и на участке Курильской дуги, соответствующем очагу готовящегося землетрясения, произошло несколько землетрясений с $M \geq 4$ (рис. 4 а, в).

Предвестники. Симуширское-I землетрясение случилось в прогнозной зоне «сейсмической бреши первого рода» (рис. 1), где согласно долгосрочному сейсмическому прогнозу в ближайшие годы ожидалось сильное землетрясение [2]. По данным [6], период с 1965 г. по середину 2006 г. может рассматриваться как сейсмическое затишье. Действительно, в период 1965–2005 гг. среднегодовое высвобождение скалярного сейсмического момента M_0 составило примерно $\bar{M}_0=5.1 \cdot 10^{18} \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{год}$, тогда как в предшествующие 64 года $\bar{M}_0 \approx 2.2 \cdot 10^{19} \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{год}$, т.е. среднегодовое высвобождение M_0 было в четыре раза больше. С середины 90-х гг. прошлого века здесь уже наблюдалось глубокое сейсмическое затишье – $\bar{M}_0 \approx 2.86 \cdot 10^{18} \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{год}$.

За два десятилетия до землетрясения 2006 г. под Курильской островной дугой и в зоне Беньоффа под Охотским морем возникло

¹ Для оценки энергии землетрясений использовалось соотношение $\lg E = 1.5 \cdot M + 4.8$, Дж, где M – магнитуда землетрясения. Для приведения магнитуд разных агентств были рассчитаны межмагнитудные корреляционные соотношения для землетрясений 2006–2007 гг. из исследуемой области. Полученные соотношения приведены в [10].

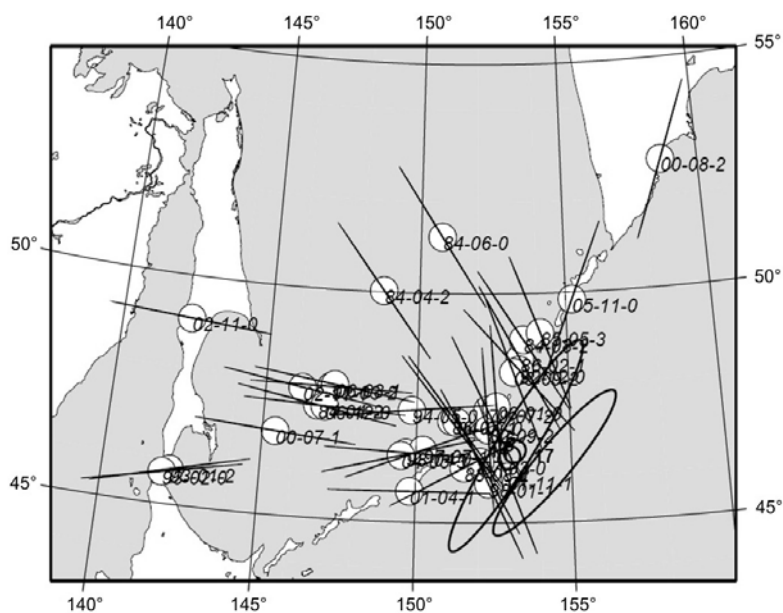


Рис. 3. Схематическое расположение очаговых зон сильнейших Симуширских-I и -II землетрясений 2006 и 2007 гг., эпицентров глубоководных форшоков Симуширского-I землетрясения и осей сжатия P в их очагах по [8]

Условные обозначения: овалы – очаговые зоны, кружки – эпицентры форшоков (цифры возле кружков – даты событий – год, месяц, число), черные прямые линии – простирание горизонтальных проекций осей сжатия в очагах глубоководных форшоков.

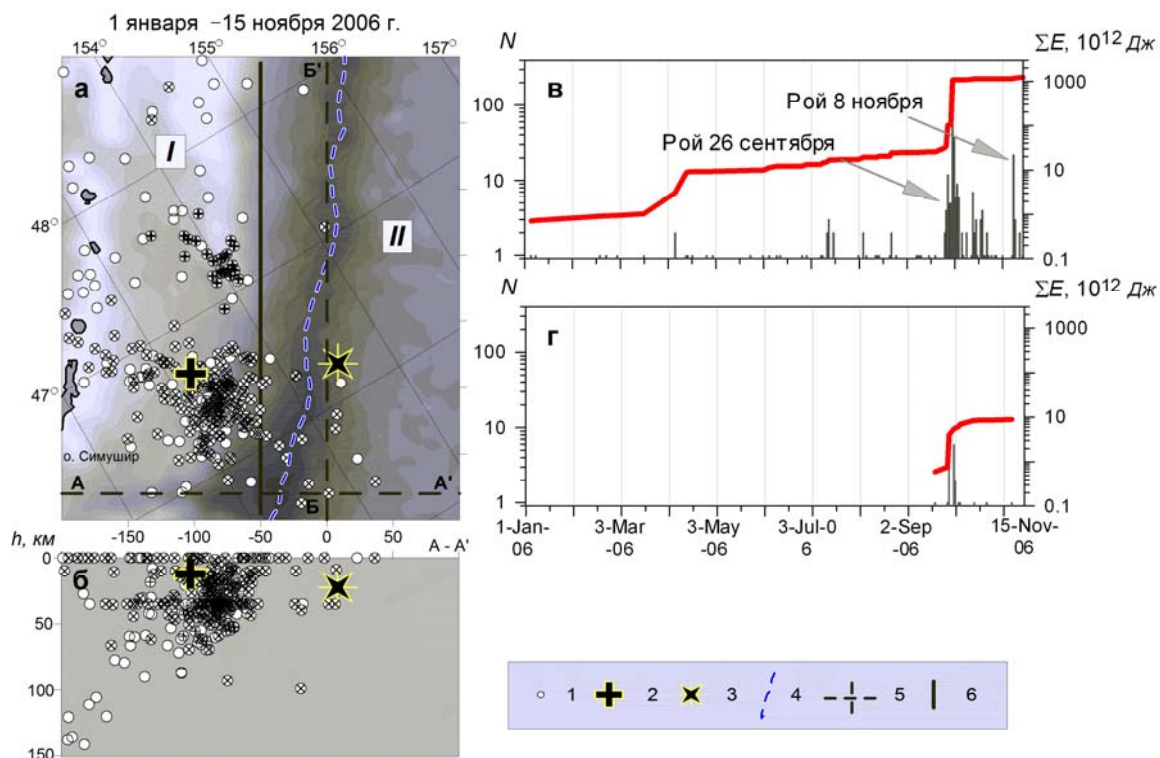


Рис. 4. Карта эпицентров (а), глубинный разрез по линии А–А' (б), графики ежедневных чисел землетрясений и суммарной сейсмической энергии землетрясений левой (в) и правой (г) частей очаговой зоны Симуширских землетрясений за период 1 января –15 ноября 2006 г.

1 – эпицентры всех землетрясений из исследуемого района по данным [1]; 2, 3 – эпицентр Симуширского-I и Симуширского-II землетрясений, соответственно; 4 – ось Курило-Камчатского глубоководного желоба; 5 – линии разрезов; 6 – линия раздела очаговых областей Симуширского-I (зона I) и Симуширского-II (зона II) землетрясений. На рис. а и б крестом обозначены эпицентры первого роя 26 сентября, прямым крестом – эпицентры второго роя 8 ноября. На фрагментах «в» и «г» вертикальные столбики – числа землетрясений, сплошная линия – сейсмическая энергия.

Макросейсмические проявления. Симуширское-I землетрясение ощущалось в Курильске с интенсивностью $I=3-4$ балла, в Северо-Курильске – 3 балла, в Южно-Курильске, а также в Петропавловске-Камчатском – 2–3 балла по шкале MSK-64 [11]. Сотрясения в Мисава и Йокосука (Япония), в восточной, южной и центральной частях побережья о. Хоккайдо оценены с интенсивностью $I=I_{JMA}$ по японской макросейсмической шкале JMA [12], что приблизительно соответствует $I=3-4$ баллам шкалы MSK-64 [13]. На западном побережье о. Хоккайдо и в префектурах Аомори, Ивати и Мийяги о. Хонсю макросейсмический эффект составил $I=I_{JMA}$ (1–2 балла шкалы MSK-64) [1]. На ближайших необитаемых островах Средних Курил, в частности, о. Симушир и на о. Матуа, обследование уже совокупных последствий Симуширского -I и -II землетрясений проводилось летом 2007 г. [14]. В результате обследования было сделано заключение, что интенсивность сотрясений на севере о. Симушир в момент сильнейшего ноябрьского землетрясения не превышала 6–7 баллов, интенсивность сотрясений на о. Матуа во время Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. была не более 5–6 баллов.

Трансокеанское цунами, вызванное Симуширским-I землетрясением, проявилось на всей акватории Тихого океана. Максимальная высота цунами, зарегистрированная стандартным мареографом на российском побережье, наблюдалась 15 ноября 2006 г. в Малокурильске (о. Шикотан) и составила 35 см, в Южно-Курильске на о. Кунашир – 20 см, на о. Беринга, в Никольском – 32 см. Волна от землетрясения дошла до побережья северного японского о. Хоккайдо, не причинив серьезного вреда. Цунами достигло побережья Калифорнии и Гавайских островов. По информации Associated Press, высота волн на Гавайях не превысила метра, на пляже Вайкики зафиксирован резкий спад воды перед приходом большой волны. Два дока были разрушены и, как минимум, еще один поврежден в Кресцент-сити в Калифорнии волной цунами, измеренная высота которой составила 176 см.

По данным Геологической службы США, волны цунами различной высоты – от 3 см до 176 см – были зафиксированы практически на всем Тихоокеанском побережье от Аляски до Новой Зеландии [15].

По расчетам специалистов Сахалинского центра цунами, в эпицентре землетрясения высота волны составила 4 м [16], но до обитаемых островов Курильской гряды она дошла высотой всего лишь 35–40 см. На Гавайских островах это же цунами было высотой 10–152 см. В рамках первого этапа морской экспедиции в район Симуширских -I и -II землетрясений и цунами, организованной в июле 2007 г. ИМГиГ ДВО РАН [16–17], было проведено обследование побережья средних Курильских островов Уруп, Симушир, Кетой. Установлено, что на о. Уруп заплески цунами достигали 6 м; на о. Кетой максимальные заплески цунами превышали 8–10 м; на о. Симушир обнаружены следы нескольких катастрофических заплесков цунами высотой более 10–15 м с тихоокеанской стороны и около 8 м – на восточной части побережья Охотского моря; в обследованных районах максимальная интенсивность цунами зарегистрирована на побережье бухты Айну на о. Матуа, где следы воздействия цунами были обнаружены на больших высотах (18–20 м) и на значительном (350–400 м) удалении от берега.

Столь изменчивые оценки высоты волны в ближней зоне Симуширского-I землетрясения, по мнению специалистов, участвовавших в обследовании, могут свидетельствовать в пользу развития подводных оползневых процессов на приостровном склоне. В случае активизации подводных сейсмогравитационных процессов в эпицентральной зоне большая интенсивность цунами на локальных участках при умеренных проявлениях на других, часто недалеко расположенных отрезках побережий, может быть объяснена с этих позиций.

Структура очага по данным о фокальном механизме. Решения механизма очага в стереографической проекции на нижней полусфере, рассчитанные различными агентствами [1], приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Решения, полученные разными методами, близки, но не идентичны. Движение в очаге Симуширского-I землетрясения произошло под действием преобладания сжимающих напряжений, ориентированных в юг–юго-восточном направлении. Тип движения в очаге по пологой плоскости близширотного простирания представляет собой надвиг с небольшой правосдвиговой составляющей (по данным агентств NEIC и MOS). Тип движения в очаге по крутопадающей плоскости северо-восточного простирания, совпадающего с простиранием Курило-Камчатской гряды, представляет взброс с небольшой левосдвиговой компонентой. Решения фокального механизма агентств GCMT, NIED близки и демонстрируют взброс по обоим нодальным плоскостям.

Таблица 2. Параметры механизмов очагов Симуширского-I (15 ноября 2006 г.) и Симуширского-II (13 января 2007 г.) землетрясений по данным различных сейсмологических агентств

Агент- ство	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды				Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Ис- точ- ник	
			M_w	MLH	MS	M_s	T		N		P		$NP1$			$NP2$				
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$		
15 ноября 2006 г.																				
SKHL	11 14 15.4	37		8.0			55	307	0	216	35	126	36	80	90	215	10	88	[18]	
MOS	11 14 14.50	26	7.7		8.0		50	297	9	39	38	136	274	11	146	38	84	81	[5]	
NEIC	11 14 13.57	10	7.9			7.8	58	316	8	60	31	155	270	16	121	58	76	81	[1]	
GCMТ	11 14 17.80	13.5	8.3				60	302	1	33	30	123	215	15	92	33	75	89	[19]	
NIED	11 15 00	8	7.8											28	56	87	214	35	95	[1]
13 января 2007 г.																				
SKHL	04 23 23.5	43		7.0			5	338	24	246	65	80	92	45	-55	227	55	-120	[18]	
MOS	04 23 23.5	54	8.0		8.2		12	310	20	45	66	192	16	37	-125	237	60	-66	[5]	
NEIC	04 23 23.5	10	8.0			8.2	39	197	15	94	47	347	348	16	-16	93	86	-106	[1]	
GCMТ	04 23 23.5	12	8.1				11	151	22	57	66	266	266	39	-54	43	59	-115	[19]	
NIED	04 23 11	11	8.0											61	47	-89	240	43	-91	[1]

Афтершоковая активность Симуширского-I землетрясения. В первые сутки после главного толчка мировой сетью сейсмических станций было зарегистрировано свыше 400 афтершоков с $M=3.5-6.7$, среди которых 5 событий имели $M \geq 6$. Эпицентры афтершоков обрисовали проекцию очага на поверхности дна океана (рис. 5). В едином облаке эпицентров сформировалось две ветви, в целом параллельные простиранию островной дуги: северо-западная, приуроченная к приостровному склону, и юго-восточная, расположенная на океаническом склоне глубоководного желоба (рис. 5 а). В дальнейшем эти две ветви в поле распределения эпицентров афтершоков сохранились (рис. 5 в). Интересной особенностью развития очагового процесса явился тот факт, что в первые же полчаса после главного толчка процесс распространился на восточный склон глубоководного желоба и землетрясения появлялись как в зоне I, так и в зоне II, не обозначая какого-либо направления магистрального разрыва (рис. 5 а). Причем сейсмическая активность правой части очаговой области не уступала таковой в ее левой части, а даже ее превосходила. По числу землетрясений эти зоны были сопоставимы ($N=670$ в зоне I и $N=930$ в зоне II), но количество высвобожденной сейсмической энергии слева оказалось равным $\Sigma E \approx 5 \cdot 10^{14}$ Дж, а в правой части более чем втрое выше – $\Sigma E \approx 18 \cdot 10^{14}$ Дж (рис. 5 д, е).

По результатам сейсмологических наблюдений в первые дни после главного толчка появилась возможность оценить длину и ширину сейсмического очага, а также предварительно восстановить характер смещений в нем. Протяженность L очага Симуширского-I землетрясения составила примерно $L \sim 300$ км в направлении с юго-запада на северо-восток. Ширина W очага главного толчка, отождествляемого с северо-западной ветвью эпицентров афтершоков первых дней, оценивается в $W \sim 120$ км. Отношение длины очага к его ширине составляет $L/W=300/120=2.5$. В первые сутки активности глубина афтершоков достигала первых 70 км, но в дальнейшем разрыв распространился до глубин ~ 150 км. Эпицентры афтершоков Симуширского-I землетрясения в период 15 ноября 2006 г. – 13 января 2007 г. распределились по очаговой области довольно неравномерно – в юго-западной части очага выделяется субмеридиональная полоса землетрясений, приуроченная, возможно, к одному из опережающих магистральный разрыв разлому. Положение очагов афтершоков на глубине (рис. 5 г) показывает приуроченность облака гипоцентров левой части к полого погружающейся под островную дугу поверхности в верхней части зоны Беньоффа. О принадлежности очагов зоны I к зоне субдукции говорят также и фокальные механизмы землетрясений, имеющиеся в каталоге GCMТ [19] (рис. 6 б).

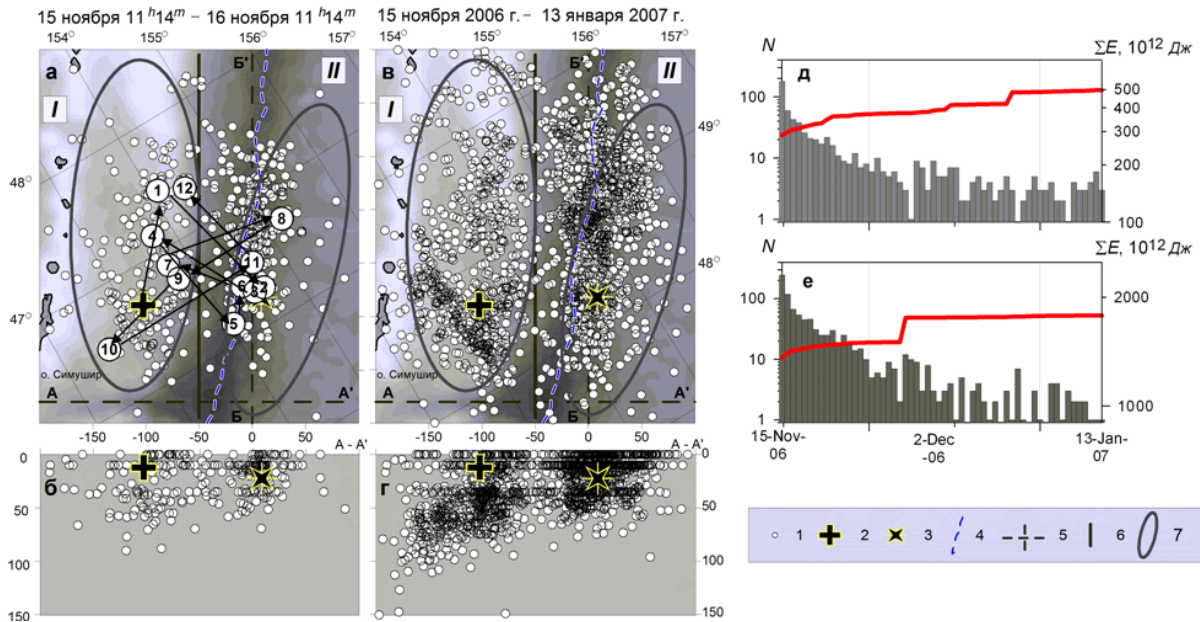


Рис. 5. Карты эпицентров и глубинные разрезы по линии А–А' афтершоков первых суток активности после главного толчка 15 ноября 2006 г. (а, б), землетрясений за период времени между Симуширским-I и Симуширским-II землетрясениями (в, г), графики ежесуточных чисел землетрясений и суммарной сейсмической энергии землетрясений левой (д) и правой (е) части очаговой зоны Симуширских землетрясений за период 15 ноября 2006 г.–13 января 2007 г.

1 – 6 те же, что на рис. 4; 7 – очаговые зоны Симуширских землетрясений; на фрагменте «а» большими кружками обозначены афтершоки первых 30 минут после главного толчка 15 ноября 2006 г., стрелками указана последовательность их возникновения; на графиках фрагмента «д» исключен главный толчок Симуширского-I землетрясения

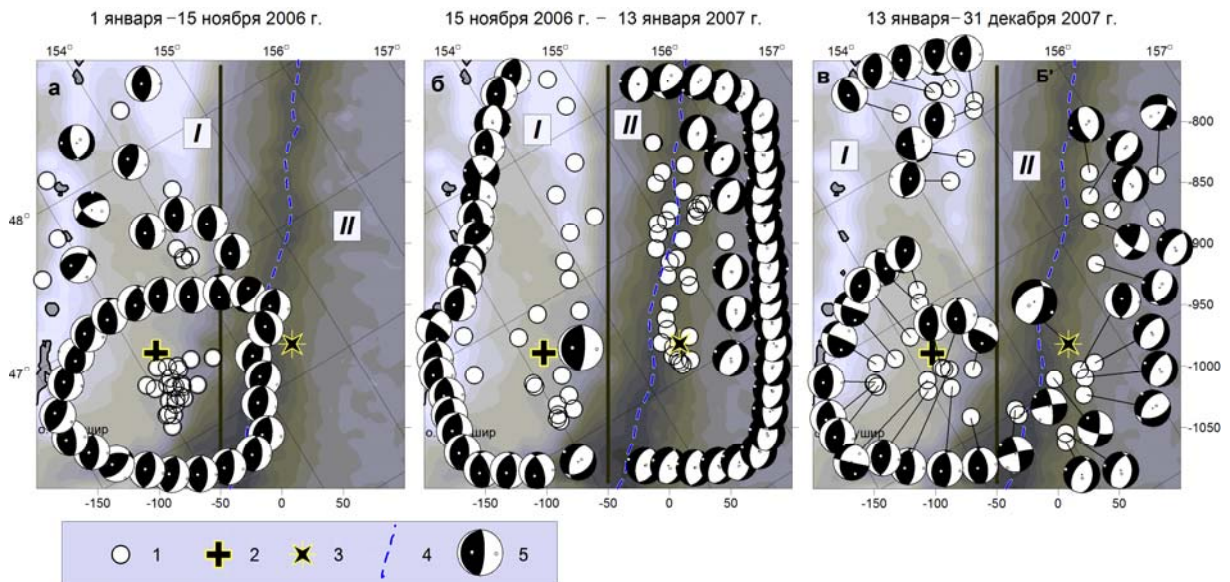


Рис. 6. Карты эпицентров землетрясений, для которых определены механизмы очага по данным каталога GСMT [19] в различные периоды времени 2006–2007 гг.

В очагах как форшоков, так и афтершоков левой (северо-западной) части очаговой области Симуширских землетрясений преобладают характерные для зоны субдукции взбросо-надвиговые движения по плоскостям, ориентированным субпараллельно простиранию глубоководного желоба (рис. 6 а, б – зона I). Землетрясения правой – юго-восточной части (зона II) – очаговой области равномерно распределены по глубине в диапазоне $h=0-70$ км (рис. 5 г) и имеют сбросовый тип механизма (рис. 6 б), что типично для области океанического вала. Столь сильные различия в механизмах очагов и распределении землетрясений по глубинам позволяют

сделать вывод, что юго-восточная ветвь отражала область очага готовящегося Симуширского-II землетрясения с $M=8.1$, возникшего на океаническом борту глубоководного желоба почти через два месяца после главного толчка – 13 января 2007 г. Формирующие эту ветвь толчки можно рассматривать как его форшоки.

Деформации поверхности. Никаких результатов прямых наблюдений сейсмогенных деформаций поверхности и сейсмодислокаций не известно. По результатам обследования последствий обоих землетрясений, которое проводилось летом 2007 г. [14] на о. Симушир и о. Матуа, ни первичных, ни вторичных сейсмодислокаций там не наблюдалось.

Данные геодезических измерений являются вспомогательными, но предоставляют весьма ценную информацию о динамике сейсмогенной зоны перед и во время сильных землетрясений. Такие результаты измерений скоростей и смещений по GPS-данным для Курильской гряды (относительно неподвижной Североамериканской плиты) собраны Г.А. Стебловым с соавторами [20]. Показательны данные о горизонтальных скоростях смещений (в $мм/год$), собранные на сети пунктов на Курилах и южной Камчатке за период с июля по ноябрь 2006 г., т.е. за несколько месяцев до Симуширского-I землетрясения 15 ноября 2006 г. Векторы смещений поверхности ориентированы на азиатский континент. Анализ пространственного распределения скоростей смещений поверхности в разных частях Курило-Камчатской дуги показал, что наибольшие значения скоростей наблюдаются на флангах дуги (на южных Курилах и юге Камчатки), в то время как в центральной части зоны скорости практически нулевые. Центральная зона заперта, блокирована. По-видимому, это отражает процесс подготовки сильного землетрясения в этой области, который сопровождается накоплением упругой энергии.

Сразу после Симуширского-I события картина деформаций резко изменилась – направление горизонтальных смещений переориентировалось в сторону океана. Этот вывод подтверждается данными измерений GPS косейсмических смещений, которые его сопровождали. Самые значительные скорости движений – более $80 мм/год$ (абсолютная амплитуда – $414 мм$) – зарегистрированы на о. Кетой и порядка $70 мм/год$ (смещение $350 мм$) на о. Матуа (по другим данным [16] горизонтальная подвижка на этих островах достигала $600 мм$) – происходили как раз в центральной части дуги, а смещения на островах южной и северной групп, а также на юге Камчатки были значительно меньше. Это согласуется с тем, что тип движения в очаге по пологой плоскости северо-восточного простираения имел надвиговую природу.

Структура очага. Резюмируя результаты сейсмологических и геодезических наблюдений, можно составить представление о структуре очага Симуширского-I землетрясения и реконструировать характер его кинематики. Оно возникло под действием сжимающих напряжений, ось которых полого погружается к океану и ориентирована в направлении северо-запад-юго-восток (см. рис. 2, б). Ось растяжения при этом более крутая и погружается под островную дугу. Нодальная плоскость северо-восточного простираения имеет крутое залегание ($56–84^\circ$), тип движения по ней – взброс с компонентой левостороннего сдвига. Вторая нодальная плоскость (см. рис. 2 а и б) залегает полого и простирается с юго-запада на северо-восток. Тип движения – надвиг с компонентами правостороннего сдвига (угол падения этой плоскости пологий – $DP=11–35^\circ$). Из двух альтернативных плоскостей в очаге главного толчка в качестве действующей следует, по-видимому, выбрать пологую плоскость, имеющую северо-восточное простираение и погружающуюся к северо-западу под углом около 20° . Такой выбор объясняется тем, что гипоцентры афтершоков заглублялись в направлении островной дуги (рис. 5 г), а горизонтальное смещение поверхности, зафиксированное геодезическими методами, было очень значительным. При этом поверхность на островах сместилась в восточном и юго-восточном направлениях. Таким образом, очаг Симуширского-I землетрясения развился вдоль пологой нодальной плоскости, ориентированной вдоль Курильской дуги. В том же, северо-восточном, направлении протягивается и длинная ось северо-западной ветви эпицентров афтершоков. Действующая плоскость полого погружалась в сторону от глубоководного желоба к островной дуге (см. рис. 6).

В этой связи становится понятно, почему при Симуширском-I землетрясении с $M_w=8.3$, возникшем на приостровном океаническом склоне Средних Курил, высота волн цунами была умеренной или даже малой в дальней зоне и большой на ближайших островах ($6–15 м$ в результате подводного оползнеобразования). Его очаг относился к типу межплитных [7], которые обычно не сопровождаются высокими волнами цунами.

Подобное же представление о структуре очага приведено в работе И.Н. Тихонова с соавторами [21]. По их мнению, очаг выражен пологой плоскостью северо-восточного простирания. Такое заключение может согласоваться с решением фокального механизма по данным GCMT [19], но противоречит решениям MOS и NEIC (см. рис. 2).

Амплитуда смещения в районе очага была, согласно результатам математического моделирования, выполненного сотрудниками Геологической службы США, значительной (до 8 м) [20]. При этом максимальную деформацию испытала часть приостровного склона, наиболее близко расположенная к океаническому желобу. По данным Г.М. Стеблова с соавторами [20], амплитуда горизонтальных смещений в очаге достигала 10 м.

Спустя месяц афтершоковый процесс Симуширского-I землетрясения пошел на спад (рис. 5 д, е), а 13 января 2007 г. произошло новое сильнейшее ($M=8.1$) Симуширское-II землетрясение, эпицентр которого располагался в 80 км к юго-востоку от эпицентра землетрясения 2006 г. Для этого сейсмического события был проведен анализ афтершоковой последовательности после основного толчка с позиций изучения сеймотектонического деформационного процесса, определяемого ходом высвобождения кумулятивного скалярного сейсмического момента ($M_{0\text{cum}}$) [6].

Предвестники Симуширского-II землетрясения 13 января 2007 г. Временной ход высвобождения накопленного сейсмического момента $M_{0\text{cum}}$ в ходе развития афтершокового процесса Симуширского-I землетрясения с $M_w=8.3$ до наступления Симуширского-II с $M_w=8.1$ по отношению к $M_{0\text{ME}}$ представлен на рис. 7 [6]. При рассмотрении графика на рис. 7 обращают на себя внимание два факта:

- почти за два месяца развития афтершокового процесса Симуширского-I землетрясения доля M_0 , высвободившегося в афтершоках, составила всего около 1.2 % от M_0 главного толчка, что аномально мало, причем около 1 % M_0 главного толчка высвободилась в течение первых суток;
- период времени с 8 декабря 2006 г. по 12 января 2007 г. может рассматриваться как выраженная фаза сейсмического затишья. За это время в афтершоках высвободилось всего 0.04 % от M_0 главного толчка.

Оба эти факта указывали на возможность возникновения повторного сильного землетрясения. Предполагая, что в течение первых двух-трех месяцев после столь сильного землетрясения в ходе развития афтершокового процесса сейсмический момент должен высвобождаться приблизительно равномерно, что фактически наблюдалось только в течение первых трех суток (см. рис. 5), по этому интервалу времени была построена аппроксимирующая регрессионная зависимость, имевшая коэффициент линейной корреляции $R_C \approx 0.77$.

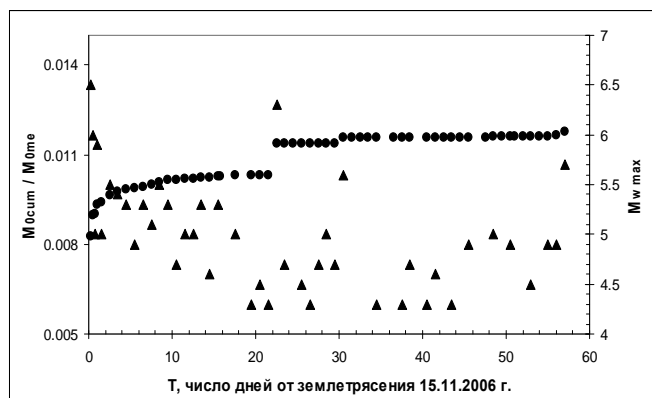


Рис. 7. Высвобождение скалярного сейсмического момента во временном интервале между событиями 15 ноября 2006 г. с $M_w=8.3$ и 13 января 2007 г. с $M_w=8.1$ [6]

Полученный по этой зависимости дефицит высвобожденного сейсмического момента M_0 к 13 января 2007 г. составил $\sim 1.50 \cdot 10^{21}$ Н·м, что эквивалентно землетрясению с моментной магнитудой $M_w \approx 8.1$. Именно такой была магнитуда Симуширского-II землетрясения.

Симуширское-II землетрясение 13 января 2007 г. Представление о размерах и положении сейсмического очага этого нового толчка можно составить на основании распространения эпицентров афтершоков первых дней после события, решения фокального механизма и данных измерений горизонтальных деформаций поверхности станциями GPS на Курило-Камчатской дуге.

Макросейсмические проявления. Симуширское-II землетрясение ощущалось от Камчатки до Японии по всем Курильским островам. Интенсивность сотрясений по 12-балльной шкале MSK-64 [11] составила 5–6 баллов в Северо-Курильске, 4–5 баллов – в Курильске, 3–4 балла – в Петропавловске, 3 балла в Южно-

Курильске и Малокурильске. Оно также ощущалось в разных частях о. Хоккайдо и на севере о. Хонсю. Были зарегистрированы сотрясения $I=III$ JMA по шкале [12], или ~ 5 баллов по шкале [11], на востоке Хоккайдо и в районе Шизунаи на севере Хоккайдо. Примерно такой же интенсивности ($I=III$ JMA) отмечались сотрясения в префектурах Аомори, Иватэ и Мияги [1].

Цунами. Была объявлена тревога цунами по всем Курильским островам. Тревога цунами объявлялась также на о. Хоккайдо. Волны цунами высотой 5–32 см были зарегистрированы на станциях Тихоокеанского побережья американского континента, Аляски, Японии, Гавайских островов [15].

Афтершоки. Основная масса эпицентров повторных толчков Симуширского-II землетрясения в первые сутки образовала линейное облако, вытянутое в направлении с юго-запада на северо-восток на океаническом склоне глубоководного желоба (рис. 8). Длина L очага по этим данным составила около $L \sim 300$ км при ширине W около ~ 90 км. Отношение $L/W=3.3$. Глубина землетрясений не превосходила 80 км (рис. 8 б). Эпицентры первых 30 минут после главного толчка мигрировали в направлении северо-восток – юго-запад и обозначили направление магистрального разрыва (рис. 8 а). В эпицентральной области Симуширского-I землетрясения в первые сутки активности зафиксировано лишь 18 землетрясений с $M < 5$ (рис. 8 а, д). Неравномерность распределения эпицентров афтершоков Симуширского-I землетрясения, наблюдавшаяся в промежутке между двумя главными событиями, усилилась после Симуширского-II землетрясения. Практически не наблюдались землетрясения в центральной части очаговой зоны, в то время как в юго-западной части сосредоточилась основная масса афтершоков (51 %). Северо-восточный край также проявил значительную активность, здесь произошло 11 % событий от общего числа землетрясений, произошедших в зоне I за время от второго главного толчка до конца 2007 г. (рис. 8 в).

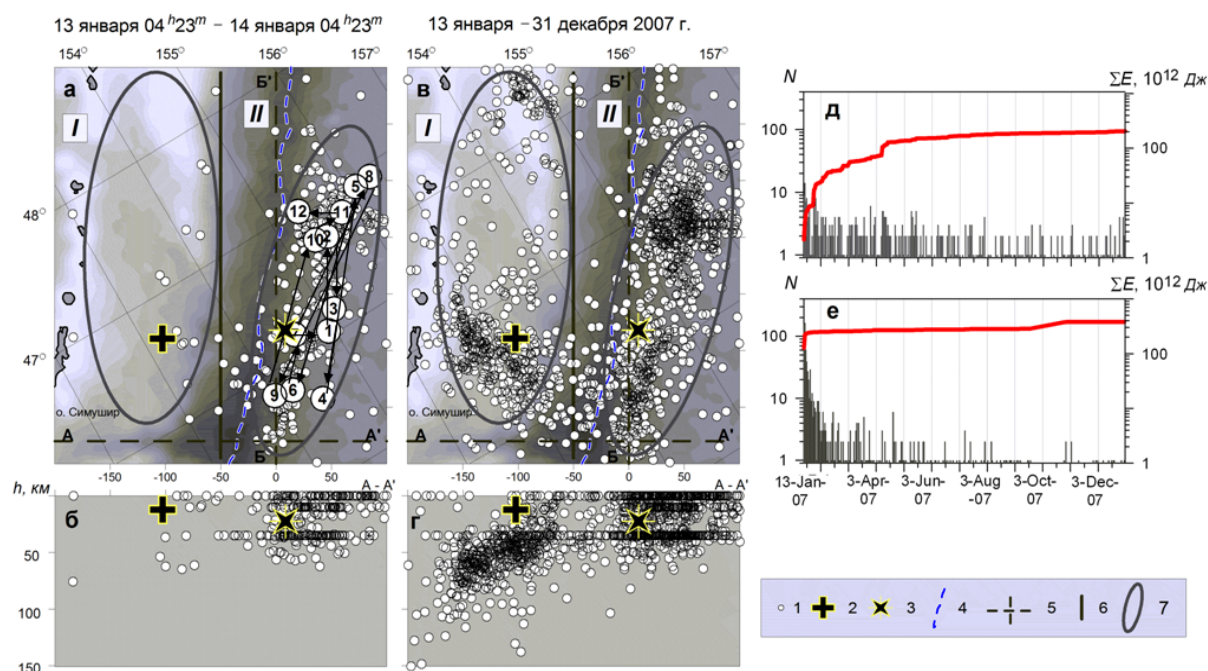


Рис. 8. Карты эпицентров и глубинные разрезы по линии А–А' афтершоков первых суток активности после главного толчка 13 января 2007 г. (а, б), землетрясений за период времени после Симуширского-II землетрясения до конца года (в, г), графики ежедневных чисел землетрясений и суммарной сейсмической энергии землетрясений левой (д) и правой (е) части очаговой зоны Симуширских землетрясений за период 13 января–31 декабря 2007 г.

1 – 6 те же, что на рис. 4, 5; на фрагменте «а» большими кружками обозначены афтершоки первых 30 минут после главного толчка 13 января 2007 г., стрелками указана последовательность их возникновения; на графиках фрагмента «д» исключен главный толчок Симуширского-II землетрясения.

Распределение эпицентров землетрясений в зоне II после Симуширского-II землетрясения также существенно изменилось. Форшоки главного толчка 13 января располагались глав-

ным образом вдоль оси глубоководного желоба, образуя область, субпараллельную простирацию Курило-Камчатского глубоководного желоба, наиболее плотную в центре (рис. 5 в). После главного толчка поле афтершоков сместилось на океанический склон желоба и распалось на две более плотные группы, расположенные к северо-востоку и юго-западу от инструментально-го эпицентра Симуширского-II землетрясения (рис. 8 в).

Структура очага Симуширского-II землетрясения по данным о фокальном механизме и результатам геодезических наблюдений. Решения фокального механизма Симуширского-II землетрясения (табл. 2, рис. 2), полученные различными агентствами, менее согласованы, чем таковые для Симуширского-I землетрясения. Тем не менее, суммируя полученные данные, можно сделать вывод, что движение в его очаге возникло под действием преобладающих напряжений растяжения, ось которых ориентирована с северо-запада на юго-восток. Практически во всех решениях присутствует нодальная плоскость северо-восточного простираения. Тип движения по обоим плоскостям – почти чистый сброс с незначительными компонентами сдвига. Такие же движения наблюдаются во всех форшоках и афтершоках Симуширского-II землетрясения (рис. 6 б, в).

По результатам проведенных наблюдений за косейсмическими смещениями поверхности в ближайшем пункте на о. Итуруп обнаружено, что он сместился в момент Симуширского-II землетрясения к север–северо-западу на 8–10 мм. При этом на Южных Курилах векторы смещений геодезических пунктов были ориентированы на северо-восток и составили 6–8 мм [20]. Эти данные, ориентировка облака эпицентров афтершоков (см. рис. 8 в), а также результаты моделирования очага по данным [20] позволяют предположить, что действующая плоскость в очаге простиралась в направлении северо-восток–юго-запад и круто ($DP=60^\circ$) погружалась к юго-востоку, в сторону океана. Смещение в очаге носило характер сброса с небольшой компонентой правого сдвига. Приподнятым оказалось крыло разлома, расположенное на океаническом склоне глубоководного желоба. Амплитуда смещения в очаге могла составить несколько метров. Однако, очаг вряд ли вышел на поверхность дна, так как вызванное землетрясением цунами оказалось незначительным. В то же время на поверхности дна в этой части океанического склона желоба имеется значительное количество узких депрессий, ориентированных с северо-востока на юго-запад, образованных, по-видимому, сбросовыми смещениями по крутым разломам на северо-восточной окраине поднятия Хоккайдо.

Заключение. Сильнейшие в XXI в. землетрясения на территории России в долгосрочном аспекте были предсказаны С.А. Федотовым методом изучения сейсмического цикла [2], а в среднесрочном аспекте модифицированным методом К.М. Моги [7–9, 22], методом вертикальной миграции форшоков в районе сильных землетрясений [23], методом среднегодового высвобождения скалярного сейсмического момента [6]. Ретроспективно были обнаружены явные геодинамические предвестники, полученные при анализе данных горизонтальных смещений в Курило-Камчатской зоне методом GPS-измерений [20, 24]. На основе анализа разнородных предвестников этих землетрясений в последующие годы была создана интеграционная система анализа прогностической информации для пространственного выделения потенциальных очагов сильных землетрясений на уровне средне- и краткосрочного прогноза [24]. Проведенный мониторинг выделения сейсмической энергии в ходе афтершокового процесса Симуширского-I землетрясения 2006 г. показал, что возникновение Симуширского-II землетрясения в январе 2007 г. можно было успешно прогнозировать на основании резкого недостатка выделяющегося скалярного сейсмического момента между двумя главными толчками.

Сам факт возникновения Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. поставил точку в давнем споре об уровне максимальных магнитуд на Средних Курилах. В прежние годы представители научной школы С.А. Федотова прогнозировали землетрясения с $M \geq 7.7$ на всей Курило-Камчатской дуге. Согласно противоположным представлениям [25, 26], сейсмический потенциал Централных Курил не превышал $M=7.5$. Природа сама рассудила этот спор в пользу представлений первого научного коллектива.

Проведенные разными авторами сеймотектонические, сейсмологические, макросейсмические и геодезические исследования позволили составить представление о размерах и структуре очагов обоих Симуширских землетрясений. Детальное изучение деформаций поверхности на островах и юге Камчатки с помощью геодезических наблюдений методом GPS позволило сделать обоснованные выводы о характере дислокаций, возникших в эпицентральной области подводных сильных сейсмических событий.

Согласно результатам анализа этого комплекса данных, очаг Симуширского-I землетрясения 15 ноября 2006 г. в рамках параметров решения фокального механизма развился вдоль пологой нодальной плоскости, ориентированной вдоль дуги. Действующая плоскость погружалась под приостровной склон под углом 20° . При этом амплитуда горизонтальных смещений надвигового типа в очаге достигала 8–10 м. Протяженность его очага составила примерно 300 км в направлении с юго-запада на северо-восток. Ширина очага главного толчка оценивается в 100–120 км.

В очаге Симуширского-II землетрясения 13 января 2007 г. действующая плоскость простиралась с северо-востока на юго-запад и круто (под углом около 60°) погружалась к юго-востоку, в сторону океана. Смещение в очаге носило характер сброса с небольшой компонентой правого сдвига. Приподнятым оказалось крыло разлома, расположенное на океаническом склоне глубоководного желоба. Амплитуда смещения в очаге могла составить несколько метров.

По аналогии с очаговой областью землетрясения Тохоку 2011 г. Симуширское-II землетрясение можно рассматривать как афтершок Симуширского-I события. В случае землетрясения 11 марта 2011 г. на о. Хонсю очаг главного толчка, так же как и на Центральных Курилах в 2006 г., располагался на приостровном склоне островной дуги, и имел взбросовый тип механизма [1]. Сильнейший афтершок землетрясения в Тохоку 11 марта с $M=7.7$, эпицентр которого приурочен к восточному, океаническому склону желоба, так же как и толчок 13 января 2007 г. на Курилах, имели схожее решение фокального механизма: близвертикальное положение оси сжатия и горизонтальное – растяжения. В обоих случаях подвижка по обеим альтернативным плоскостям представляла собой сброс [27].

В этой связи встает вопрос, можно ли рассматривать Симуширские землетрясения как парные события, имеющие различную природу. Первое землетрясение с $M_w=8.3$ является субдукционным, с типичным для таких землетрясений взбросо-надвиговым механизмом очага и распределением афтершоков по глубине, характерным для полого погружающейся под островную дугу плоскости в верхней части зоны Бенъоффа. Второе событие, имевшее соизмеримое с первым значение магнитуды и произошедшее почти через два месяца после первого, относится к океаническому валу Тихоокеанской плиты и имеет типичный для таких областей сбросовый механизм очага. Симуширское-I землетрясение инициировало процесс подготовки Симуширского-II события, который завершился землетрясением с $M_w=8.1$. Очаговые области Симуширских землетрясений имеют примерно одинаковые размеры и разделены отчетливой зоной молчания. Все эти признаки позволяют рассматривать Симуширские землетрясения как парные события, каждое из которых предварялось форшоками и сопровождалось собственным мощным афтершоковым процессом.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-00205-а) и Программы 4 Президиума РАН.

Л и т е р а т у р а

1. **Bulletin of the International Seismological Centre.** – Thatcham, United Kingdom: ISC. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
2. **Федотов С.А.** Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. – М.: Наука, 2005. – 304 с.
3. **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. // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. – Петропавловск-Камчатский: Книжное издательство «Камчатский печатный двор», 2004. – С. 178–201.
4. **Дорошкевич Е.Н. (отв. сост.), Брагина Г.И., Гладырь Ж.В., Пиневиц М.В.** Каталог землетрясений Курило-Охотского региона за 2007 г. ($N=1015$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
5. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2007 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2007–2008. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2007.
6. **Лутиков А.И.** Сейсмический мониторинг очаговых зон сильных землетрясений // Физика Земли. – 2008. – № 3. – С. 9–21.

7. **Захарова А.И., Рогожин Е.А.** Предвестники сильных землетрясений в регионе Курильских островов после 2004 г. // Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сборник трудов Седьмых геофиз. чтений им. В.В. Федынского. – М.: Научный мир, 2006. – С. 268–275.
8. **Захарова А.И., Рогожин Е.А.** Сильные Курильские землетрясения 2006–2007 гг. // Геофизика XXI столетия: 2007 год. Сборник трудов Девярых геофиз. чтений им. В.В. Федынского. – М.: Научный мир, 2008. – С. 76–81.
9. **Могн К.** Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1988. – 382 с.
10. **Левина В.И.** Каталог землетрясений района очаговой зоны Симуширских землетрясений за 2006–2007 гг. ($N=3154$) по данным Bulletin of the International Seismological Centre [1]. – Обнинск: Фонды ГС РАН, 2013. – 54 с.
11. **Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). 1965.** Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР. – 11 с.
12. **Hisada T., Nakagawa K.** Present Japanese Development in Engineering Seismology and their Application to Buildinge. Japan, 1958.
13. **Давыдова Н.А. (отв. сост.), Брагина Г.И., Пиневиц М.В., Паршина И.А., Коваленко Н.С., Левит Е.В.** Курило-Охотский регион // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ГС РАН, 2001. – С. 323–347.
14. **Пинегина Т.К., Чирков С.А., Кравчуновская Е.А.** Обследование макросейсмических эффектов Симуширских землетрясений. – Южно-Сахалинск: СФ ГС РАН. – URL: [http://_ivs_bibl_sotrudn_stpineg_12\[1\].pdf](http://_ivs_bibl_sotrudn_stpineg_12[1].pdf)
15. **WCATWC Tsunami Catalog** // NOAA, West Coast and Alaska Tsunami Warning Center. – Washington, USA. – URL: <http://oldwcatwc.arh.noaa.gov/about/tsunamimain.php>
16. **Левин Б.В., Фицхью Б., Бурджуа Д., Рыбин А.В., Пинегина Т.К., Кайстренко В.М., Сасорова Е.В., Разжигаева Н.Г., Белоусов А.Б., Копанина А.В., Борисов С.А., Носов М.А., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И., Ивельская Т.Н., Прытков А.С., Евдокимов Ю.В., Жарков Р.В., Козлов Д.И., Ганзей .С., Кравчуновская Е.А., Чирков С., Нюшко Т.И., Харламов А.А., Коротеев И.Г.** Комплексная экспедиция на Центральные Курильские острова в 2007 г. (II этап) // Вестник ДВО РАН. – 2008. – № 1 (57). – С. 11–121.
17. **Левин Б.В., Лихачева О.Н., Рыбин А.В., Шестакова О.М.** Международные комплексные экспедиции на Средние Курилы – новый шаг в реконструкции геодинамики островной дуги // Вестник РФФИ. – 2008. – № 2 (58). – С. 59–66.
18. **Сафонов Д.А. (отв. сост.)** Каталог механизмов очагов землетрясений Курило-Охотского региона за 2007 г. ($N=7$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
19. **The Global CMT Project (GCMT).** – New-York, USA. – URL: www.global.cmt.org/CMTsearch.html
20. **Steblov G.M., Kogan M.G., Levin B.V., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Frolov D.I.** Coseismic and Postseismic Deformations From Great 2006–2007 Kuril Earthquakes Revealed by Regional GPS Observations // Eos Trans. AGU. – 2007. – 88(52). – Fall Meet. Suppl., Abstract. – G13A-0916.
21. **Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Левин Ю.Н., Прытков А.С., Фролов Д.И.** Симуширские землетрясения 2006–2007 гг. – новая страница в истории Курильской сейсмоактивной зоны // <http://www.emsd.ru/konf071112/pdf/t1/str215.pdf>. – С. 215–219.
22. **Захарова А.И., Рогожин Е.А.** Сильные землетрясения северо-западной окраины Тихого океана и их глубокофокусные предвестники // Вестник ОГГ РАН. – 2000. – 1. – № 2 (12). – С. 82–94.
23. **Лутиков А.И., Юнга С.Л.** Вертикальная миграция форшоков в районе сильных землетрясений в Курило-Камчатской зоне // Геофизические исследования. Вып.2. – М.: ИФЗ РАН, 2005. – С. 33–43.
24. **Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д., Захаров В.С., Лутиков А.И., Славина Л.Б., Рейснер Г.И., Овсяченко А.Н., Юнга С.Л., Новиков С.С.** Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реального сейсмического прогноза / Отв. ред. А.О. Глико. – М.: Светоч Плюс, 2011. – 368 с.
25. **Рейснер Г.И., Рогожин Е.А.** Сейсмоструктура и геодинамика переходных зон на примере Курильского региона // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 1. – С. 42–53.
26. **Тараканов Р.З.** Сейсмический потенциал Курило-Охотского региона // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Т. VI. – Южно-Сахалинск, 1997. – С. 75–94.
27. **Рогожин Е.А.** Землетрясение Тохоку 11.03.2011 г. с $M=9.0$ в Японии: тектоническая позиция очага, макросейсмические, сейсмологические и геодинамические проявления // Геотектоника. – 2011. – № 5. – С. 3–16.