

**СИМУШИРСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2006-2007 гг. -
НОВАЯ СТРАНИЦА В ИСТОРИИ КУРИЛЬСКОЙ СЕЙСМОАКТИВНОЙ ЗОНЫ**

Тихонов И.Н.¹, Василенко Н.Ф.¹, Левин Ю.Н.², Прытков А.С.¹, Фролов Д.И.³

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, *tikhonov@imgg.ru*

²Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, Южно-Сахалинск

³Физико-технический институт РАН им. А.Ф. Иоффе; Санкт-Петербург

Параметры главных толчков, афтершоковые процессы

15 ноября 2006 г. в 11 час 14 мин по Гринвичу восточнее острова Симушир на континентальном склоне в земной коре произошло катастрофическое землетрясение. По оценке Сейсмологического центра Гарвардского университета (Кембридж, Массачусетс, США) его магнитуда M_W составила 8.3, а по данным службы NEIC¹. – 7.9. По данным Информационно-обрабатывающего центра Геофизической службы РАН (Обнинск) $M_S = 8.2$, а Сахалинского филиала ГС РАН (СФ ГС РАН, Южно-Сахалинск) - 8.1. Положения эпицентра главного толчка ($\varphi = 46.6^\circ$ с.ш., $\lambda = 153.2^\circ$ в.д.) и его афтершоков первых суток по сообщениям NEIC показаны на рис. 1а. Здесь не приводятся карты эпицентров по данным СФ ГС РАН ввиду низкой точности оценок.

Макросейсмический эффект землетрясения в баллах шкалы MSK-64 составил 3 балла в г. Северо-Курильск (о. Парамушир), 3 – 4 в г. Курильск (о. Итуруп) и 2 – 3 балла в пос. Южно-Курильск (о. Кунашир). К сожалению, из-за отсутствия населения на о. Симушир, не удалось получить данные о сотрясениях на этом ближайшем к эпицентру землетрясения острове.

Спустя почти два месяца 13 января 2007 г. в 4 час 23 мин в том же районе, но уже в пределах глубоководного желоба ($\varphi = 46.29^\circ$ с.ш., $\lambda = 154.49^\circ$ в.д.), возникло еще одно сильное землетрясение с $M_W = 8.1$ и 8.2 по данным тех же американских центров (рис. 1б). Отечественные центры в Обнинске и Южно-Сахалинске дали соответственно $M_S = 8.1$ и 8.3.

Макросейсмические проявления второго катастрофического события оказались более существенными: 5-6 баллов в г. Северо-Курильск, 4-5 в пос. Курильск, 3 балла в пос. Южно-Курильск и в пос. Малокурильское.

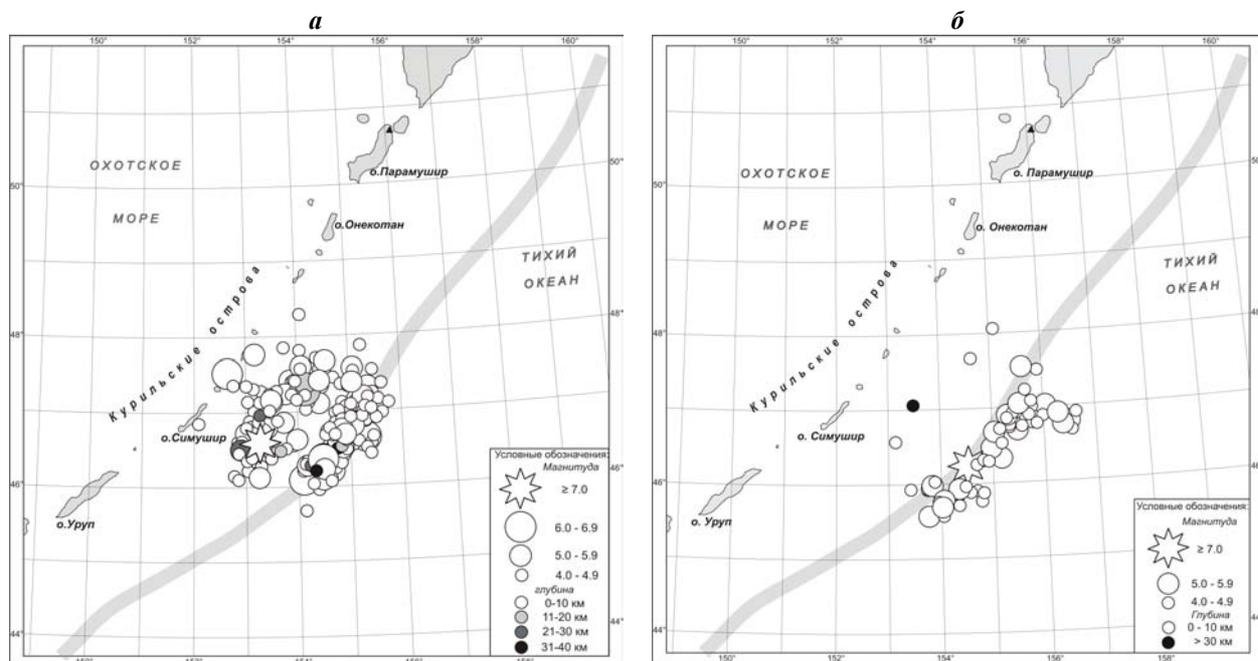


Рис. 1. а - положение эпицентра главного толчка Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. (звездочка) и его афтершоков с $M \geq 4.5$ (кружки), зарегистрированных в течение первых суток после основного события по данным каталога NEIC, б – то же для Симуширского землетрясения 13.01.2007 г. Узкая полоса – ось глубоководного желоба.

¹ Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США (Голден, Колорадо, США)

Описываемые катастрофические события занимают особое место в сейсмической истории Курильской зоны, поскольку наблюдаются впервые за историческое время в районе Средних Курил. Они существенно меняют сложившиеся представления о сейсмическом потенциале данного района и продолжительности сейсмического цикла.

На рис. 1а отчетливо видно, что эпицентры повторных толчков землетрясения 15 ноября 2006 г. образуют две тесные группы, вытянутые вдоль Курильского желоба и разделенные узкой полосой молчания. Эта примечательная особенность распределения эпицентров вначале была не вполне понятна, пока не произошло второе катастрофическое событие 13 января 2007 г. После этого стало ясно, что в течение первых суток происходила не только разрядка напряжений в очаге первого события, но и подготовка магистрального разрыва в будущем очаге второго события.

Характерной особенностью местоположений крупнейших землетрясений Курило-Камчатской зоны является приуроченность их к основным геоморфологическим структурам островных дуг – подводным хребтам. Согласно Л.М. Балакиной [1] очаги сильнейших курильских землетрясений, расположенных южнее примерно 46° с.ш., располагаются вдоль двух основных подводных хребтов – Витязя в верхней части континентального склона и Фронтального в нижней части склона. Очаги обсуждаемых Симуширских землетрясений, оконтуренные по афтершокам первых суток, хорошо укладываются в данную схему двухрядного размещения. Более того, они уточняют ее в районе Центральных Курил, поскольку там, на момент подготовки работы [1], отсутствовали данные о сильнейших землетрясениях в первом ряду (вдоль хребта Витязя).

Для обоих сейсмических процессов в районе острова Симушир наибольшая афтершоковая активность наблюдалась в течение нескольких суток, после чего отмечался значительный ее спад (таблица 1). По данным каталога NEIC в очаговой области первого события и вне ее в течение первых суток возникло 203 толчка с $M \geq 4.5$, а в очаге второго, более сильного землетрясения – только 70. Это несоответствие объясняется скорее всего тем, что из 203 ноябрьских повторных толчков примерно 120 являлись по своей сути форшоками главного январского события 2007 г. В первом афтершоковом процессе существовал явный дефицит числа сильных событий в диапазоне магнитуд 6.5 – 7.0. Это свидетельствовало о незавершенности разрядки напряжений и высокой вероятности сильного повторного толчка, что и случилось спустя около двух месяцев.

Механизм очагов главных толчков

В 2006 г. сотрудниками лаб. сейсмологии ИМГиГ ДВО РАН Н.Ф. Василенко и А.С. Прытковым на Курильских островах была создана сеть из 11 пунктов GPS наблюдений, достаточно равномерно покрывающих всю Курильскую островную дугу [2]. На пяти GPS станциях: SHKT (о. Шикотан, п. Малокурильское), KUNH (о. Кунашир, г. Южно-Курильск), ITRP (о. Итуруп, г. Курильск), URUP (о. Уруп, мыс Кастрикум), PRMH (о. Парамушир, г. Северо-Курильск) наблюдения ведутся непрерывно.

Горизонтальные косейсмические смещения земной поверхности от Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. были зарегистрированы станциями непрерывной GPS регистрации Курильской геодинамической сети и региональными станциями YSSK (г. Южно-Сахалинск) и PETS (г. Петропавловск-Камчатский). Вертикальные смещения станций не определены в силу значительной удаленности от эпицентров землетрясений (500 – 900 км). Данные с ближайшей станции URUP, удаленной от эпицентров на расстояние около 300 км, в настоящее время получены, но до конца не обработаны.

Изменение среднесуточных координат ближайшей к эпицентрам станции ITRP свидетельствует о достаточно быстром переходном процессе после косейсмических подвижек, который завершился в течение 1 – 2 недель. Сейсморазрывы практически не развивались после главных толчков, т.е. напряжения были сброшены сразу. Это согласуется и с приведенными выше сейсмологическими данными о развитии афтершоковых процессов.

Для землетрясения 15.11.2006 г. достоверно определены горизонтальные косейсмические смещения на станциях ITRP, KUNH, SHKT и YSSK. Максимальное смещение 13.5 мм зафиксировано на станции ITRP. На станциях PRMH и PETS смещения были незначительными. Горизонтальные смещения в результате землетрясения 13.01.2007 г. определены на всех станциях. Максимальная величина (около 14 мм) была получена на GPS станции PRMH.

Оценка параметров механизмов очагов землетрясений по наблюдаемым косейсмическим смещениям выполнена для очага в форме конечного прямоугольного источника с однородным смещением в упругом полупространстве [7]. Параметрами модельного разлома являются его геометрические размеры (протяженность по простиранию и ширина по падению), направление

простираения и угол падения плоскости разлома, местоположение (координаты центроида плоскости разлома), величина максимального смещения в центроиде (по простираению и падению). Для обоих землетрясений рассмотрены различные варианты дислокационных моделей, соответствующие двум нодальным плоскостям в сейсмологических решениях NEIC и HRV (далее – Harvard) (таблица 2).

Для дислокационной модели землетрясения 15.11.2006 г. наиболее подходящим оказалось сейсмологическое решение механизма очага по Harvard с субмеридиональной нодальной плоскостью, полого падающей на запад. Модельное решение для второй нодальной плоскости не может создать даже подобия наблюдаемых горизонтальных косейсмических смещений. Однако наилучшее согласование модельных и измеренных смещений потребовало вариации простираения, угла падения и направления смещения в плоскости сейсморазрыва.

Параметры дислокационной модели механизма очага Симуширского землетрясения 15.11.2006 г., полученные из инверсии имеющихся геодезических данных, приведены в таблице 2. Они указывают на западное падение плоскости разлома. Общая протяженность сейсморазрыва может достигать ~ 300 км, его ширина ~ 60 км. Величина максимального смещения по падению в плоскости сейсморазрыва (взброс) ~ 6.7 м. Модельные значения магнитуды M_W и геодезического момента M_0 достаточно хорошо согласуются с их определением по сейсмологическим данным.

Решения NEIC и Harvard механизма очага землетрясения 13.01.2007 г. имеют значительный разброс. Зафиксированные косейсмические смещения не согласуются ни с одним из рассмотренных сейсмологических решений. Поэтому поиск оптимальной дислокационной модели этого землетрясения выполнен без ограничения всех ее параметров. Выполненные расчеты показали, что измеренные косейсмические смещения соответствуют сбросу по плоскости сейсморазрыва северо-восточного простираения, круто падающей на северо-запад. Направление простираения модельной плоскости разлома согласуется с простираением облака афтершоков первых суток после основного события (рис. 1б).

Параметры оптимальной дислокационной модели механизма очага землетрясения 13.01.2007 г., полученные из инверсии геодезических данных, приведены в таблице 2. Они указывают на северо-западное падение плоскости разлома. Модельные значения магнитуды M_W и геодезического момента M_0 близки к их определению по сейсмологическим данным. Общая протяженность сейсморазрыва может достигать ~ 180 км, его ширина ~ 46 км. Величина максимального смещения по падению в плоскости сейсморазрыва (сброс) ~ 5.1 м.

Выполненные расчеты дислокационных моделей по имеющимся геодезическим данным следует рассматривать как предварительные оценки. В настоящее время обрабатываются данные GPS наблюдений, полученные в 2007 г. на пунктах Курильской геодинамической сети, ближайших к эпицентральной зоне Симуширских землетрясений, которые позволят уточнить модельные параметры очагов.

Долгосрочные и краткосрочные предвестниковые эффекты

Как сказано выше, обсуждаемые Симуширские землетрясения явились экстраординарными событиями для данного района. На протяжении многих десятилетий вопрос о возможности землетрясений с $M \geq 7.7$ на Средних Курильских островах оставался дискуссионным. Например, в долгосрочных прогнозах С.А. Федотова [6] здесь в качестве бреши постоянно выделялся участок № 7 (о-в Симушир - пролив Крузенштерна). Противоположной точки зрения придерживался ряд других сейсмологов, например, Р.З. Тараканов [5]. Можно констатировать, что очаговые области сильнейших землетрясений 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. располагаются непосредственно в зоне сейсмической бреши первого рода, существовавшей, по крайней мере, с 1730 года. Согласно Новому каталогу [4], севернее и южнее этой области в начале прошлого века наблюдались два катастрофических землетрясения 1 мая 1915 г. ($M = 8.3$) и 7 сентября 1918 г. ($M = 8.2$). Таким образом, описываемые землетрясения реализовались в рамках долгосрочного прогноза С. А. Федотова на вышеупомянутом участке № 7 [6].

Таблица 1. Затухание в течение месяца числа афтершоков в очагах Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. и 13 .01.2007 г.

Дата основного толчка	Количество афтершоков с магнитудой ≥ 4.5 , зарегистрированных службой NEIC в течение первых, вторых, ..., 30-ых суток																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
15.11.2006 г.	203	66	32	16	21	16	17	14	14	14	3	7	8	5	5	2	1	3	1	3	3	0	4	3	2	2	2	3	4	3
13.01.2007 г.	70	14	6	8	5	4	3	0	1	1	1	1	3	3	2	5	1	3	3	0	2	0	1	2	0	0	1	0	1	0

Таблица 2. Параметры дислокационных моделей очагов Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. и 13 .01.2007 г. по геодезическим и сейсмологическим данным

Источник механизма очага	Центроид			Прости- рание, град.	Падение, град.	Направление смещения в плоскости разлома град.	Длина, км	Ширина, км	Максим. смещение по падению, м	Максим. смещение по простиранию, м	M_W	Момент M_0 10^{28} Н·м
	Широта, град.	Долгота, град.	Глубина, км									
Параметры дислокационных моделей очага Симуширского землетрясения 15.11.2006 г.												
ИМГиГ, геодезия	46.75	154.32	13.5	200	11	95	296	58	6.7	0.6	8.26	2.71
Harvard, сейсмология	46.75	154.32	13.5	214	15	92					8.30	3.51
				33	75	90						
NEIC, сейсмология	46.68	153.23	7	270	16	121					7.90	
				58	76	81						
Параметры дислокационных моделей очага Симуширского землетрясения 13.01.2007 г.												
ИМГиГ, геодезия	46.18	154.80	12.0	222	70	- 60	180	46	5.1	1.7	7.96	0.99
Harvard, сейсмология	46.18	154.80	12.0	263	40	- 57					8.10	1.65
				42	58	- 114						
NEIC, сейсмология	46.35	154.43	10	348	16	- 16					7.90	
				93	86	- 106						

Примечание. Для вычисления момента M_0 и магнитуды M_W на основе параметров дислокационной модели использованы формулы:

$$M_0 = \mu U S, M_W = (\lg M_0 / 1.5) - 10.7, \text{ где } \mu = 3 \cdot 10^{10} \text{ Па} - \text{ жесткость, } S - \text{ площадь разлома, } U - \text{ средняя дислокация по плоскости разлома.}$$

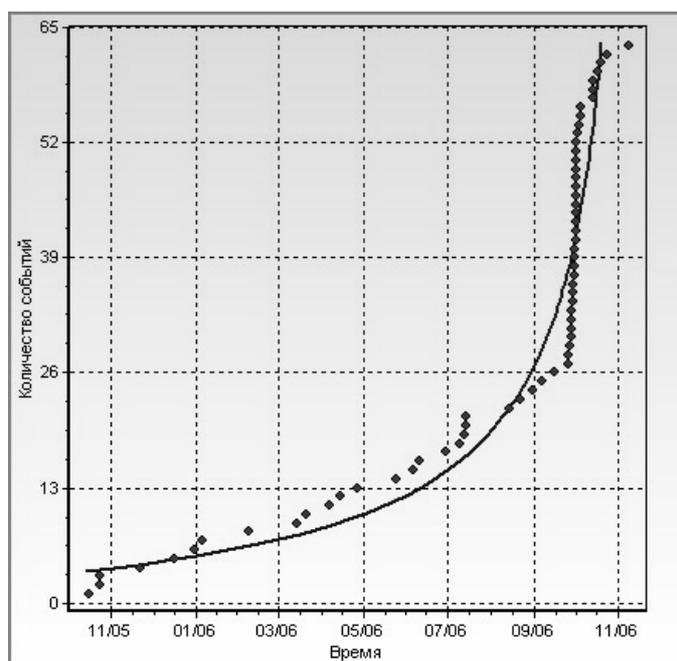


Рис. 2. Предвестниковая активизация сейсмичности, выявленная в районе Средних Курильских островов в период 15.10.2005 г. 10 час 06 мин – 08.11.2006 г. 8 час 22 мин по данным Оперативного каталога СФ ГС РАН. Точечная кривая – наблюдаемая кумулятивная сумма числа толчков с $M \geq 4.5$, гладкая кривая – результат моделирования точечной кривой с помощью уравнения саморазвивающихся процессов [3]. Оценка даты главного толчка – 16 ноября 2006 г.

Вертикальная асимптота для данного уравнения, определяющая прогнозную оценку времени возникновения сильного события, дает дату 16 ноября 2006 г.

Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН 06-II-CO-08-030, 06-III-B-08-375 и гранта ARC-0508109 Национального Научного Фонда США.

Список литературы

1. Балакина. Л.М. Курило-Камчатская сейсмогенная зона – строение и порядок генерации землетрясений // Физика Земли. 1995. № 12. С. 48-57.
2. Левин Б.В., Фитцхью Б., Бурджуа Дж., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г., Белоусов А.Б., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Нюшко Т.И., Харламов А.А., Коротеев И.Г. Комплексная экспедиция на Курильские острова в 2006 г. (I этап) // Вестник ДВО РАН. 2007. №1. С. 144-148.
3. Малышев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 61-72.
4. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука. 1977. 535 с.
5. Тараканов Р.З. Возможно ли возникновение сильнейшего землетрясения в районе Средних Курильских островов? // Тез. докл. Международного научного симпозиума «Проблемные вопросы островной и прибрежной сейсмологии (ОПС-2005)». Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2005. С. 131.
6. Федотов С. А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской зоны. М.: Наука. 2005. 303 с.
7. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismol. Soc. of America. 1985, Vol. 75. P. 1135-1154.

Анализ сейсмичности в районе Средних Курильских островов (между проливами Буссоль и Крузенштерна) в период, непосредственно предшествовавший землетрясению 15 ноября 2006 г. с $M_S = 7.8$, показывает, что и краткосрочный прогноз данного события мог бы быть достаточно успешным при условии получения необходимой информации в реальном времени. На рис. 2 показана зависимость кумулятивной суммы числа толчков (N) от времени, построенная по данным оперативного каталога СФ ГС РАН.

Из данного рисунка видно, что с ноября 2005 года до сентября 2006 года наблюдался стационарный ход кумулятивной суммы. Затем сейсмическая активность стала резко нарастать и кумулятивная кривая на рис. 2 приобрела резко нелинейный характер.

В этот период произошли два крупных форшока: 30 сентября 2006 г. с $M_{LH} = 6.9$ и 1 октября 2006 г. с $M_{LH} = 6.7$.

Активизация на рис. 2 моделируется уравнением саморазвивающихся процессов [3]

$$\frac{d^2 N}{dt^2} = 0.0439 \times \left(\frac{dN}{dt} \right)^{1.5708}$$