

**ТЕНЗОР МОМЕНТА И МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ о. САХАЛИН***Д.А. Сафонов<sup>1,2</sup>, Т.В. Назорных<sup>1</sup>, А.В. Коновалов<sup>1</sup>*<sup>1</sup>*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия*<sup>2</sup>*Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия**e-mail: d.safonov@imgg.ru*

Изучение сейсмотектонического режима Северного Сахалина вызывает большой интерес исследователей. Это связано во-первых с добычей углеводородов в сейсмически активном регионе и сопряженными с этим экологическими и экономическими рисками, во-вторых с тем, что здесь произошло в 1995 г. крупнейшее катастрофическое землетрясение современной России.

Ранее [5] авторами на основании каталога механизмов землетрясений о. Сахалин 1962-2011 гг. было показано основное направление сейсмотектонических напряжений территории острова. Получены оценки средних параметров сейсмодислокаций как с учетом скалярного сейсмического момента очага землетрясения, так и без него, для отдельных зон и всего региона в целом. Установлено, что большинство землетрясений Сахалинского региона произошли в условиях близгоризонтальных сжимающих напряжений, ориентированных субширотно или диагонально о. Сахалин.

Исходя из этого, представляет интерес оценка землетрясений, произошедших в последнее десятилетие. Поскольку сильные события на территории о. Сахалин, относящегося к поясу с умеренной сейсмичностью, часто не наблюдаются, имеет смысл привлекать к исследованиям более слабые события с магнитудой  $M=4.0-4.5$ . Для этого необходимо внедрять современные, более точные и менее трудоемкие методики оценки механизма очага и тензора сейсмического момента.

В данной работе авторы приводят данные о рассчитанных механизмах и тензоре сейсмического момента очагов землетрясений, произошедших в последнее десятилетие (2006-2014 гг.) и не вошедших в упомянутый выше каталог. Каталог полученных решений механизмов очага представлен в виде табл.1 и показан на рис.1 и рис.2. Механизмы очага землетрясений независимо определялись с использованием двух различных методик.

Во-первых, решения механизмов землетрясений были получены методом первых вступлений Р-волн (использовалась программа FOCMEC [3]) с привлечением первых смещений в S-волне, методика подробно описана в [5]. Данный подход используется в ИМГиГ ДВО РАН на протяжении последних десятилетий и хорошо себя зарекомендовал. Однако он достаточно трудозатратен и в условиях дефицита данных (относительно слабых землетрясений) не всегда позволяет получить устойчивое решение. Для снятия знаков привлекались записи региональных сейсмостанций СФ ГС РАН, ДВО РАН и телесеismicических станций глобальной сейсмографической сети.

Во-вторых, расчет тензора сейсмического момента проводился с использованием программного комплекса ISOLA, разработанного профессором Дж. Заградником (J. Zahradnik, Charles University, Прага, Чехия) и доктором Е. Сокосом (E. Sokos, University of Patras, Греция) [10]. Программа позволяет рассчитывать полный тензор момента землетрясения, однако рекомендуется ограничиваться девиаторной частью, как более стабильной. Определяемыми величинами, помимо компонент тензора момента, являются глубина, среднее время центроида, сейсмический момент и моментная магнитуда.

Апробация программы ISOLA проводилась в 2012-2014 гг. на данных наиболее характерных землетрясений Сахалинского и Курило-Охотского регионов, произошедших примерно в то же время [4]. К настоящему моменту получено около двух сотен решений тензоров сейсмического момента землетрясений.

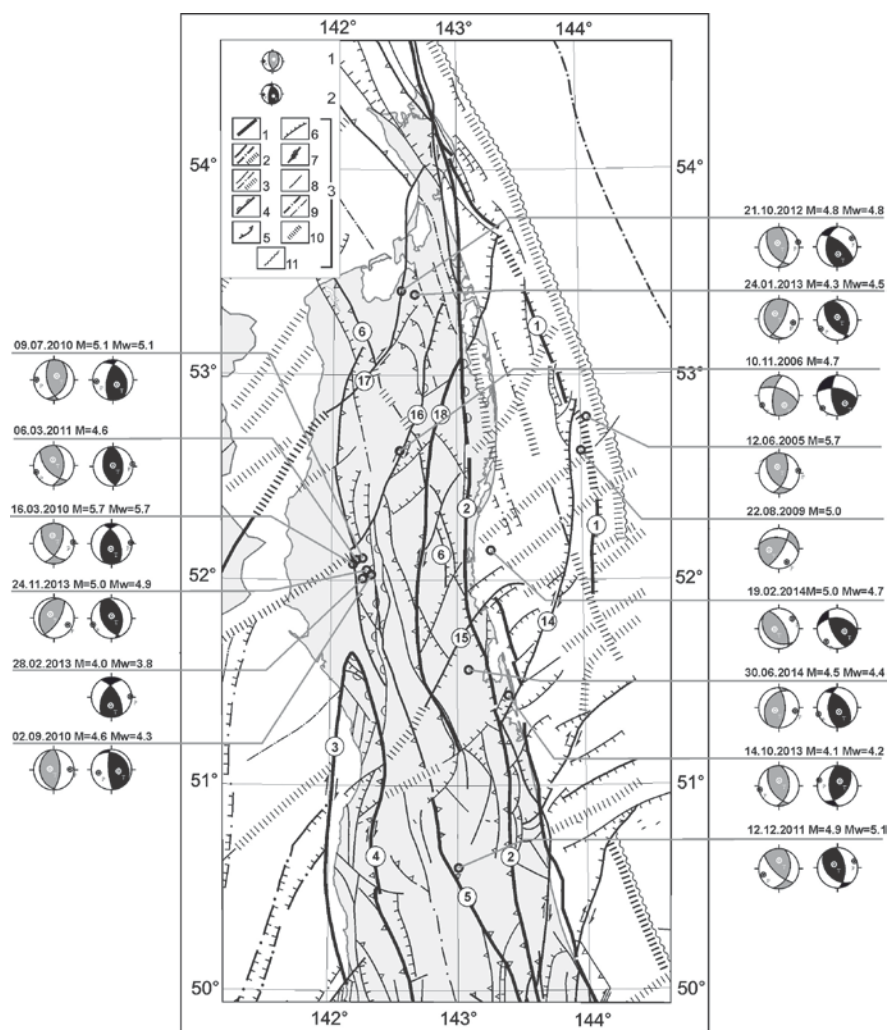


Рис. 1. Положение эпицентров рассматриваемых землетрясений, и схема разломов северной части о. Сахалин согласно В.В. Харинову [8].

1: стереограмма механизмов очагов землетрясений, полученных с использованием FOCMEC; 2: стереограмма двухдипольного приближения тензора момента землетрясений, решение получено с использованием ISOLA; 3: 1-3 – ранг разломов: 1 – глубокого заложения, 2 – региональные, 3 – зональные; 4-7 – кинематика разломов: 4 – надвиги, 5 – взбросы, 6 – сбросы, 7 – сдвиги; 8-10 – сфера действия разломов: 8 – земная кора, 9 – нижняя часть осадочной толщи и консолидированная часть земной коры, 10 – консолидированная часть земной коры, 11 – зоны повышенной трещиноватости земной коры.

В качестве базовой модели строения коры и верхней мантии была принята модель, используемая в настоящий момент агентством NIED, Япония [9] для аналогичных целей. Однако для региона Северного Сахалина была применена комбинированная скоростная модель, в нижней часть соответствует упомянутой модели NIED, а верхняя, коровая часть, составлена специально для территории Северного Сахалина и в настоящий момент используется для локализации гипоцентров по данным локальной сети [6]. Входными данными для инверсии послужили записи ближайших широкополосных сейсмо станций СФ ГС РАН («Оха», «Тымовск», «Углегорск», «Южно-Сахалинск»), сейсмо станций широкополосной сети ДВО РАН [7] («Чегдомын», «Ванино», «Николаевск-на-Амуре»), сейсмо станции агентства NIED, расположенные на о. Хоккайдо [9]. Поскольку работа велась в основном с записями относительно слабых землетрясений ( $M \sim 4.0-5.0$ ), для уточнения достоверности полученных решений привлекались знаки первых вступлений, снятые на сейсмограммах тех же станций.

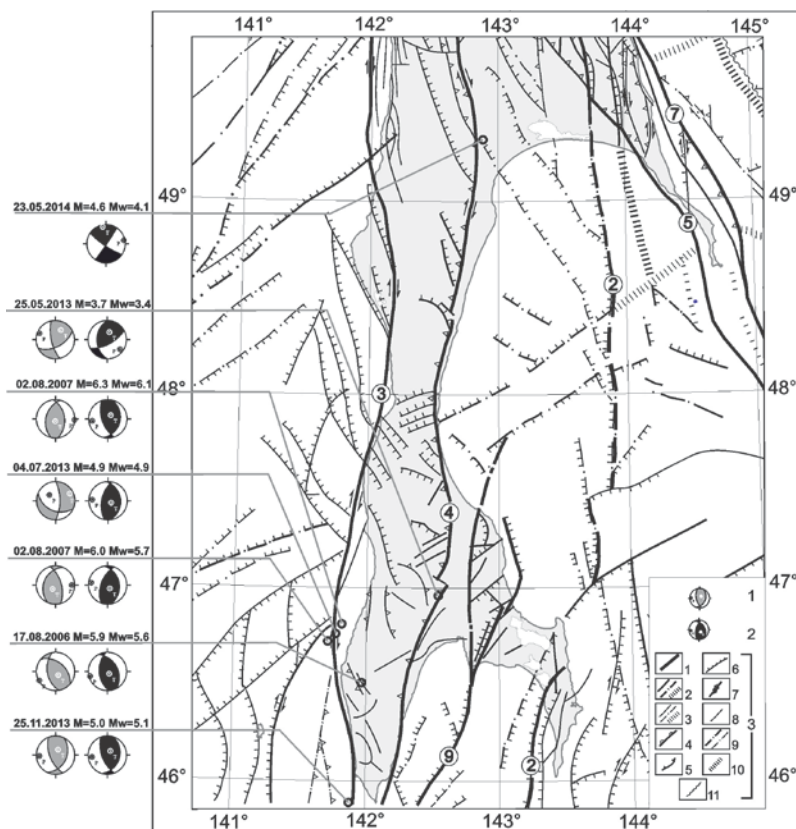


Рис. 2. Положение эпицентров рассматриваемых землетрясений и схема разломов южной части о. Сахалин согласно В.В. Харинову [8]. Условные обозначения соответствуют таковым на рис. 1.

Всего было обработано 22 сейсмических события, в некоторых случаях решение удалось получить только по одной из упомянутых методик.

Выполненная работа позволяет сравнить механизм очага землетрясений умеренной магнитуды, полученный с использованием двух различных методик. Как можно убедиться из сопоставления их стереограмм (рис.1, рис.2) полученные решения не идентичны. Хотя тип сейсмодислокации почти во всех случаях совпадает, решения механизмов очага значительно (угол Кагана достигает  $60^\circ$ ) отличается. Положение оси промежуточных напряжений (пресечение нодальных плоскостей) в некоторых случаях меняется на противоположное, впрочем, все так же близгоризонтальное. Наибольшее отличие отмечено для землетрясения 04.07.2013 (№16 в табл.1), тип сейсмодислокации меняется со сбросо-сдвигового, полученного по первой методике, на взбросовый (результат принят как основной в дальнейших рассуждениях).

Подобное различие в определении можно объяснить разницей в методических подходах: метод полярностей первых вступлений оценивает ориентацию плоскости разрыва в начальный момент вспарывания разрыва, тогда как метод инверсии волновых форм рассматривает модель центра, среднюю для всего разрыва. Начальное направление вспарывание может измениться, что должно отобразиться в разнице получаемых решений.

Другое объяснение – ограниченная точность получаемых решений. Все-таки приходится иметь дело с приближенной моделью строения земной коры, в которой невозможно учесть все локальные и региональные неоднородности. Причем чем более близкие станции используются в расчетах (а для относительно слабых землетрясений – это вынужденная мера), тем большее влияние локальные неоднородности оказывают на получаемые решения. Способ повышения точности и надежности результата как в случае метода первых вступлений, так и при инверсии волновых форм – увеличение плотности сети сейсмостанций и улучшение качества их записей (соотношения сигнал/шум), а так же совершенствование скоростных моделей среды.

Все рассмотренные землетрясения произошли в условиях сжатия, при этом ось сжатия (P-pl) горизонтальна, ее направление (P-az) меняется от субширотного до юго-запад – северо-восточного, за

исключением землетрясения 22.08.2009 (№4 табл. 1), ось сжатия которого направлена на юго-восток. Это землетрясение локализовано в области более сильного Пильтунского землетрясения, произошедшего 12.06.2005 г. [2], и, вероятно, может считаться повторным событием. Эпицентр этого землетрясения попадает в область Восточно-Сахалинского разлома, однако ни одна из его плоскостей не совпадает с простиранием разлома, возможно, имела место подвижка по второстепенному секущему разлому, обозначенному на схеме. Еще одно землетрясение, ось сжатия которого не укладывается в общую схему, произошло 25.05.2013 в южной части острова (№15 в табл.1) в зоне Центрально-Сахалинского разлома и может классифицироваться как взбросо-сдвиг в условиях северо-запад - юго-восточного сжатия. Также это самое слабое из обработанных землетрясений  $M_w=3.4$ .

На продолжении центрально-Сахалинского разлома находится эпицентр еще одного землетрясения со сдвиговым типом сейсмодислокации, произошедшего 23.05.2014. Также сдвиговая компонента преобладает в механизме очага землетрясения 10.11.2006 г. (№3 в табл.1), эпицентр данного землетрясения попадает в область Гыргыланьинского правостороннего взбросо-сдвига, при этом одну из нодальных плоскостей землетрясения, имеющую именно правосдвиговую компоненту сейсмодислокации, можно сопоставить с направлением разлома. В механизмах очагов остальных землетрясений преобладает взбросовая компонента.

Наиболее сильное событие в северной половине острова – Уангское 2010 г. ( $M=5.7$ , №7 в табл.1) – было хорошо изучено ранее [1], хотя новая интерпретация его механизма несколько отличается от принятой в статье, не противореча при этом сделанным в ней выводам. Еще пять обработанных землетрясений являются его афтершоками, механизмы афтершоков в рамках некоторой вариации направления и наклона нодальных плоскостей сходны с механизмом главного толчка. Их гипоцентры расположены по падению плоскости Западно-Энгизпальского надвига.

В южной части острова сильнейшими событиями последнего десятилетия были Невельские землетрясения 02.08.2007 (№4 и №5 в табл.1), их механизмы очагов были переопределены с использованием ISOLA, результаты в целом соответствуют вариантам, полученным ранее. Стоит отметить глубину модельного центроида, полученную при расчете:  $H=2$  км для первого землетрясения и  $H=4$  км для второго, что намного меньше, чем глубина гипоцентра. В целом, глубина центроида часто сильно отличается от стартового инструментального значения ввиду погрешностей определения, однако в случае данных землетрясений это может быть связано с особенностями очага, который, как известно, вышел на поверхность, о чем свидетельствуют необратимые поднятия дна в порту г. Невельск.

Таким образом, полученные результаты определения механизмов очагов умеренно-сильных землетрясений о. Сахалин в 2006-2014 гг. с использованием двух различных методик в целом согласуются с результатами, опубликованными в [5], даже несмотря на некоторое различие полученных решений. Произошедшие землетрясения отражают продолжающийся процесс сжатия островной суши, при этом ось сжатия близгоризонтальна и направлена либо субширотно, либо с восток-северо-востока на запад-юго-запад.

Таблица 1. Параметры землетрясений о. Сахалин и их механизмов, полученных с использованием ISOLA (светлые поля) и FOCMEC (затемненные поля).

№	Дата	Время	$\phi$	$\lambda$	$H_c$ /H	$M_w$ / $M_L$	T		P		NP1		
	день.мес. год	ч:мин:сек	град	град	км		pl	az	pl	az	stk	dip	rake
1	12.06.2005	4:17:10.1	52.8	144.07	15	5.7	64	350	14	111	175	36	52
2	17.08.2006	15:20:34.1	46.51	141.92	10	5.6	77	144	5	255	176	51	106
	17.08.2006	15:20:34.1	46.51	141.92	15	5.9	69	144	3	241	170	51	117
3	10.11.2006	8:53:47.7	52.63	142.54	9	-	40	135	4	229	175	66	146
	10.11.2006	8:53:47.7	52.63	142.54	20	4.7	40	150	4	240	190	64	148
4	02.08.2007	2:37:39.5	46.81	141.81	2	6.1	68	38	16	263	161	62	74
	02.08.2007	2:37:39.5	46.81	141.81	11	6.3	79	188	1	93	194	45	105

5	02.08.2007	5:02:16.0	46.72	141.71	4	5.7	71	148	12	278	200	59	107
	02.08.2007	5:22:16.0	46.72	141.71	14	6.0	67	216	14	90	203	35	123
6	22.08.2009	10:26:41.0	52.63	144	12	5.0	47	262	20	149	282	41	156
7	16.03.2010	09:44:13.50	52.08	142.17	8	5.7	67	187	4	87	200	45	123
	16.03.2010	09:44:13.50	52.08	142.17	5	5.7	54	350	4	86	144	52	42
8	09.07.2010	15:17:44.9	52.11	142.25	18	5.1	64	140	16	265	329	34	53
	09.07.2010	15:17:44.9	52.11	142.25	4	5.1	68	34	12	271	23	36	121
9	02.09.2010	7:08:00.6	52.03	142.32	15	4.3	57	102	31	256	176	77	102
	02.09.2010	7:08:00.6	52.03	142.32	19	4.6	72	284	17	88	171	28	80
10	06.03.2011	15:48:53.2	52.1	142.2	6	5.2	85	350	0	83	169	45	84
	06.03.2011	15:48:53.2	52.1	142.2	9	4.6	64	351	6	249	4	45	127
11	12.12.2011	9:28:40.1	50.64	143	5	5.4	68	315	9	68	355	57	114
	12.12.2011	9:28:40.1	50.64	143	5	4.9	53	2	16	249	17	41	145
12	21.10.2012	11:57:26,4	53,41	142,55	5	4,8	57	171	13	60	183	41	138
	21.10.2012	11:57:26,4	53,41	142,55	11	4,8	70	343	1	75	4	49	117
13	24.01.2013	14:15:48,6	53,39	142,66	4	4,5	77	0	6	242	142	52	76
	24.01.2013	14:15:48,6	53,39	142,66	1	4,3	60	324	24	104	28	71	108
14	28.02.2013	20:37:00,7	52,01	142,25	8	3,8	52	185	5	88	211	52	140
15	25.05.2013	6:19:20,7	46,96	142,54	4	3,7	53	16	15	127	180	41	35
	25.05.2013	6:19:21,0	46,98	142,54	8	3,7	38	30	10	292	167	71	36
16	04.07.2013	11:08:28,0	46,76	141,73	9	4,9	73	122	15	274	191	60	99
	04.07.2013	11:08:28,0	46,76	141,73	10	4,9	16	63	50	312	360	70	-52
17	14.10.2013	8:36:25,6	51,44	143,4	4	4,2	67	28	5	287	177	53	62
17	14.10.2013	8:36:25,6	51,44	143,4	10	4,1	66	4	4	259	150	52	60
18	24.11.2013	10:20:28.2	52.05	142.28	7	4.9	80	2	3	251	152	49	78
	24.11.2013	10:20:28.2	52.05	142.28	12	5.0	67	317	21	116	32	67	98
19	25.11.2013	3:23:53.7	45.88	141.88	13	5.1	66	35	17	263	159	64	71
	25.11.2013	3:23:53.7	45.88	141.88	13	5.0	62	24	14	267	158	63	63
20	19.02.2014	12:49:06.7	52.15	143.27	13	4.7	55	111	13	220	155	65	125
	19.02.2014	12:49:06.7	52.15	143.27	9	5.0	71	262	15	54	331	62	100
21	23.05.2014	23:42:41.8	49.32	142.88	10	4.1	9	349	5	79	34	87	170
22	30.06.2014	20:58:12.5	51.57	143.09	7	4.4	69	158	1	251	180	50	118
	30.06.2014	20:58:12.5	51.57	143.09	20	4.5	69	237	16	101	212	32	118

#### Список литературы

1. Коновалов А.В., Семенова Е.П., Сафонов Д.А. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16 марта 2010 г. ( $M_w = 5.8$ ) на северо-западе о. Сахалин // Вулканология и сейсмология. – 2012. – №4. – С. 37-49.
2. Коновалов А.В., Патрикеев В.Н., Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Семенова Е.П., Степнов А.А. Пильтунское землетрясение 12 июня 2005 г. ( $M_w=5.6$ ) и современная сейсмичность в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин // Тихоокеанская геология. – 2015. – Т. 34. – № 1. – С. 61-71.
3. Snoke J.A., Munsey J.W., Teague A.C., Bollinger G.A. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data // Earthquake Notes. V. 55. No. 3. 1984. P. 15.
4. Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Определение тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой Международной сейсмологической школы. Республика Армения, 8-12 сентября 2014 г. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 294-298.
5. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин / А.В. Коновалов, Т.В. Нагорных, Д.А. Сафонов; отв. ред. А.И. Кожурин. – Владивосток: изд-во Дальнаука, 2014. – 252 с.
6. Степнов А.А., Гаврилов А.В., Коновалов А.В., Отемолер Л. Новая архитектура автоматизированной системы сбора, хранения и обработки сейсмологических данных // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49. – № 2. – С. 27-38.
7. Ханчук А.И., Коновалов А.В., Сорокин А.А. и др. Инструментальное и информационно-технологическое обеспечение сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России // Вестник ДВО РАН. – 2011. – № 3. – С. 127-137.
8. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. – М. : Научный мир, 2010. - 276 с.
9. Kubo A., E. Fukuyama, H. Kawai, K. Nonomura NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application // Tectonophysics. 356. 2002. pp. 23-48.
10. Sokos E. N., Zahradnik J. ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data // Computers & Geosciences. – 2008. – Vol. 34, Issue 8. – PP. 967-977.