

## УТОЧНЕНИЕ ПОРОГОВОЙ МАГНИТУДЫ ОБЪЯВЛЕНИЯ ТРЕВОГИ ЦУНАМИ ДЛЯ АКВАТОРИИ ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ ЦУНАМИ

*Золотухин Д.Е.<sup>1</sup>, Ивельская Т.Н.<sup>2</sup>, Семенова Е.П.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

<sup>2</sup> *Центр цунами, ФГБУ «Сахалинское Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», г. Южно-Сахалинск, t\_ivelskaya@sakhugms.ru*

<sup>3</sup> *Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Южно-Сахалинск*

### Введение

В настоящее время основным рабочим методом, применяемым Службой предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России при принятии решения об объявлении тревоги цунами, является сейсмический метод, основанный на регистрации опережающих цунами сейсмических волн. Возможность возникновения цунами в результате землетрясения оценивается по магнитудно-географическому критерию. Землетрясение считается цунамиопасным, если его эпицентр попадает в цунамигенную зону, а интенсивность превышает заданное для данного региона пороговое значение магнитуды. Для землетрясений в Японском море пороговое значение магнитуды составляет 7.0 [4, 6]. Оценить эффективность магнитудно-географического критерия цунамиопасности для Японского моря возможно путем анализа исторических данных о проявлении цунами на япономорском побережье Дальнего Востока России.

### Исторические сведения о проявлении цунами на япономорском побережье Дальнего Востока России

Основная цунамигенная зона Дальнего Востока России совпадает с западным склоном Курило-Камчатского желоба. В окраинных морях Тихого океана, омывающих дальневосточные берега России, цунами возникают реже. Наиболее опасно в отношении цунами Японское море. Цунамигенная зона Японского моря проходит вдоль восточного побережья Кореи, западного побережья Японии и юго-западного побережья о. Сахалин, в ней сосредоточены все известные очаги цунами в данном регионе.

Данные о проявлении сильнейших цунами в Японском море в XX–XXI вв. (начиная с 1939 г.) представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Сильнейшие цунамигенные землетрясения в Японском море в XX–XXI вв.

Дата	Широта	Долгота	Глубина гипоцентра, км	Магнитуда	Заплеск цунами, м
01.05.1939	39.90° N	139.88° E	22	7.0	0.3 / –
01.08.1940	44.47° N	139.52° E	35	7.5	3.5 / 3.5
16.06.1964	38.44° N	139.23° E	11	7.5	5.8 / 0.6
05.09.1971	46.56° N	141.19° E	17	6.9	2.05 / 2.05
26.05.1983	40.46° N	139.09° E	23	7.8	14.5 / 5.0
12.07.1993	42.85° N	139.20° E	16	7.6	32 / 4.43
02.08.2007	46.83° N	141.75° E	10.6	6.2	3.2 / 3.2

Примечание. В последнем столбце – максимальный заплеск цунами; в числителе – на побережье Японского моря, в знаменателе – на российском побережье Японского моря. Данные по цунами взяты из [1, 2, 8, 9, 12].

При анализе данных о проявлении сильнейших цунами в Японском море в XX–XXI вв. на берегах Дальнего Востока России, следует обратить внимание на то, что эпицентр цунамигенного землетрясения 16.06.1964 с магнитудой  $M = 7.5$ , не вызвавшего опасное (с заплеском, превышающим 1 м) цунами на российском побережье, находился западнее о. Хонсю. Очаги же опасных цунами, вызванных событиями 05.09.1971 и 02.08.2007 с меньшей магнитудой ( $M < 7$ ) находились в южной части Татарского пролива. Значительный заплеск цунами 05.09.1971 и 02.08.2007 на юго-западном побережье острова Сахалин, вызванных землетрясениями с относительно слабой магнитудой, объясняется малой глубиной гипоцентров землетрясений (17 и 10.6 км соответственно) и близостью эпицентров к побережью.

Приведенные примеры показывают, что магнитудно-географический критерий цунамиопасности для Японского моря требует детализации. С целью выявления зависимости цунамиопасности подводных землетрясений в Японском море от географических координат и

выработки предложений по изменению магнитудно-географического критерия цунамиопасности япономорских землетрясений авторами были выполнены две серии вычислительных экспериментов.

### Первая серия вычислительных экспериментов

При численном моделировании была использована модель «макросейсмического» источника цунами [4, 6]. В этой модели реальный источник замещается начальным возвышением уровня в виде половинки эллипсоида, проектирующегося на зону максимальных сотрясений при землетрясении, а его параметры зависят от параметров макросейсмического очага [10]. Необходимая для оценки макроскопического эффекта землетрясения магнитуда оценивается из наблюдений, а глубина очага принимается известной априори (как правило, используется наиболее вероятная глубина фокуса в районе возникновения землетрясения [5]).

Данная модель, предложенная в [4], была проверена на примере реальных исторических цунами на Дальнем Востоке России [7, 11] и показала практическую пригодность для грубых оценок высот цунами вблизи берега.

На первом этапе численное моделирование было проведено с использованием модельных источников, размещенных в сейсмоактивных зонах Японского моря. Координаты модельных источников представлены в таблице 2. Источники № 1, 2, 4 выбраны исходя из [5], остальные – на основе данных об исторических цунами (включая слабые), представленных в [12].

Так как землетрясения с  $M < 6.5$  в Японском море (исключая Татарский пролив), как правило, не представляют опасности с точки зрения проявления цунами на япономорском побережье Дальнего Востока России, а цунамиопасность землетрясений с магнитудой  $M > 8.0$  очевидна, то в ходе вычислительных экспериментов для каждого модельного источника были заданы значения магнитуд от  $6.5 \leq M \leq 8.0$ , с шагом магнитуд 0.25. В качестве глубины очага цунамигенного землетрясения при численном моделировании, согласно [7], было принято значение 25 км, как наиболее вероятная глубина фокуса в районе возникновения землетрясения. Исключением были модельные источники 1 и 2 в Татарском проливе, в котором, согласно [5], наиболее вероятными глубинами очагов цунамигенных землетрясений являются глубины 10 и 15 км. В данной работе для модельных источников 1 и 2 было выполнено численное моделирование цунами с глубиной гипоцентра 10 км (как наиболее опасной), для магнитуд от 6.0 до 7.5 с шагом 0.25.

Таблица 2. Параметры модельных источников и результаты первой серии вычислительных экспериментов

№ п/п	Широта центра источника	Долгота центра источника	Азимут направления большой оси	Глубина очага, км	Диапазон магнитуд	Пороговая магнитуда $M_n$
1	49.30°N	141.70°E	0°	10	6.0–7.5	6.7
2	46.37°N	141.23°E	158°	10	6.0–7.5	6.7
3	44.50° N	139.50° E	0°	25	6.5–8.0	7.2
4	43.00°N	139.30°E	0°	25	6.5–8.0	7.2
5	40.00°N	139.08°E	0°	25	6.5–8.0	7.7
6	37.50°N	137.92°E	55°	25	6.5–8.0	7.7
7	35.83°N	135.00°E	90°	25	6.5–8.0	7.7
8	35.00°N	131.75°E	50°	25	6.5–8.0	7.7
9	38.00°N	130.00°E	145°	25	6.5–8.0	7.5

Примечание.  $M_n$  – магнитуда в модельном очаге цунамигенного землетрясения, при которой в одной из «мареографных» точек побережья наблюдается интенсивное (с заплеском 1 м или более) цунами.

Модельные источники цунами и «мареографные» точки российского побережья Японского моря, для которых рассчитывались заплески волн цунами, показаны на рисунке 1 (общее число «мареографных» точек – 22).

Результаты вычислительных экспериментов представлены в последнем столбце Таблицы 2 и на рисунке 1.



Рис. 1. Модельные источники цунами (первая серия вычислительных экспериментов) и «мареографные» точки

Расчётное значение пороговой магнитуды для модельных источников западнее о. Хонсю составляет 7.7. Это означает, что землетрясения с магнитудой  $M < 7.5$  в юго-восточной части Японского моря (западнее о. Хонсю) не порождают опасных для побережья Дальнего Востока России цунами.

Для проверки правильности данного предположения была выполнена вторая серия вычислительных экспериментов.

### **Вторая серия вычислительных экспериментов**

На этом этапе было выполнено численное моделирование 18 исторических цунами, данные о которых взяты из [12]. Из 18 очагов исторических цунами шесть было с интенсивностью  $>2$ , семь – с интенсивностью 2, и четыре – с неизвестной интенсивностью и магнитудой  $M \geq 7$ . Также было выполнено моделирование очага цунами 09.12.1802 (№ 17) с неизвестной интенсивностью и магнитудой  $M = 6.6$ .

Численное моделирование выполнялось для глубин 25 км (наиболее вероятная глубина очага цунамигенного землетрясения) и 10 км (как более опасной).

В Таблице 3 представлены параметры и результаты второй серии вычислительных экспериментов. Указаны даты реальных цунамигенных землетрясений, для которых выполнено численное моделирование. Максимальный заплеск цунами рассчитывался для 22 прибрежных «мареографных» точек Дальнего Востока России – тех же, что и в предыдущей серии вычислительных экспериментов.

На рисунке 2 показаны модельные источники для второй серии вычислительных экспериментов для глубины 10 км. Подчеркнуты источники, вызвавшие опасные цунами.

Таблица 3. Параметры цунамигенных землетрясений и результаты второй серии вычислительных экспериментов.

№ п/п	Дата	Широта	Долгота	Азимут	Магнитуда	Максимальный заплеск (м) для глубины очага	
						10 км	25 км
1	12.07.1993	42.85°N	139.20°E	0°	7.6	11.99	1.27
2	16.06.1026	34.80°N	131.80°E	50°	7.5	2.71	0.19
3	07.03.1927	35.83°N	134.92°E	90°	7.6	8.19	0.41
4	29.08.1741	41.60°N	139.40°E	0°	6.9	0.59	0.08
5	07.12.1833	38.09°N	139.15°E	25°	7.4	3.52	0.34
6	26.05.1983	40.47°N	139.08°E	0°	7.8	16.38	1.98
7	12.05.701	35.70°N	135.40°E	90°	7.0	0.82	0.03
8	27.11.850	39.00°N	139.82°E	15°	7.0	0.56	0.01
9	10.07.863	37.10°N	138.00°E	55°	7.0	0.24	0.03
10	02.08.1887	37.50°N	138.10°E	45°	6.5	0.08	0.01
11	13.06.1792	43.50°N	140.60°E	45°	7.1	1.69	0.14
12	01.08.1940	44.47°N	139.52°E	0°	7.5	27.67	1.36
13	16.06.1964	38.43°N	139.23°E	20°	7.5	5.62	0.29
14	31.10.1341	41.00°N	139.50°E	0°	7.0	0.75	0.09
15	19.09.1448	37.50°N	138.20°E	45°	7.0	0.68	0.06
16	19.06.1694	40.20°N	139.97°E	0°	7.0	0.60	0.03
17	09.12.1802	37.70°N	138.30°E	35°	6.6	0.19	0.02
18	22.10.1894	38.90°N	139.77°E	15°	7.0	0.49	0.03

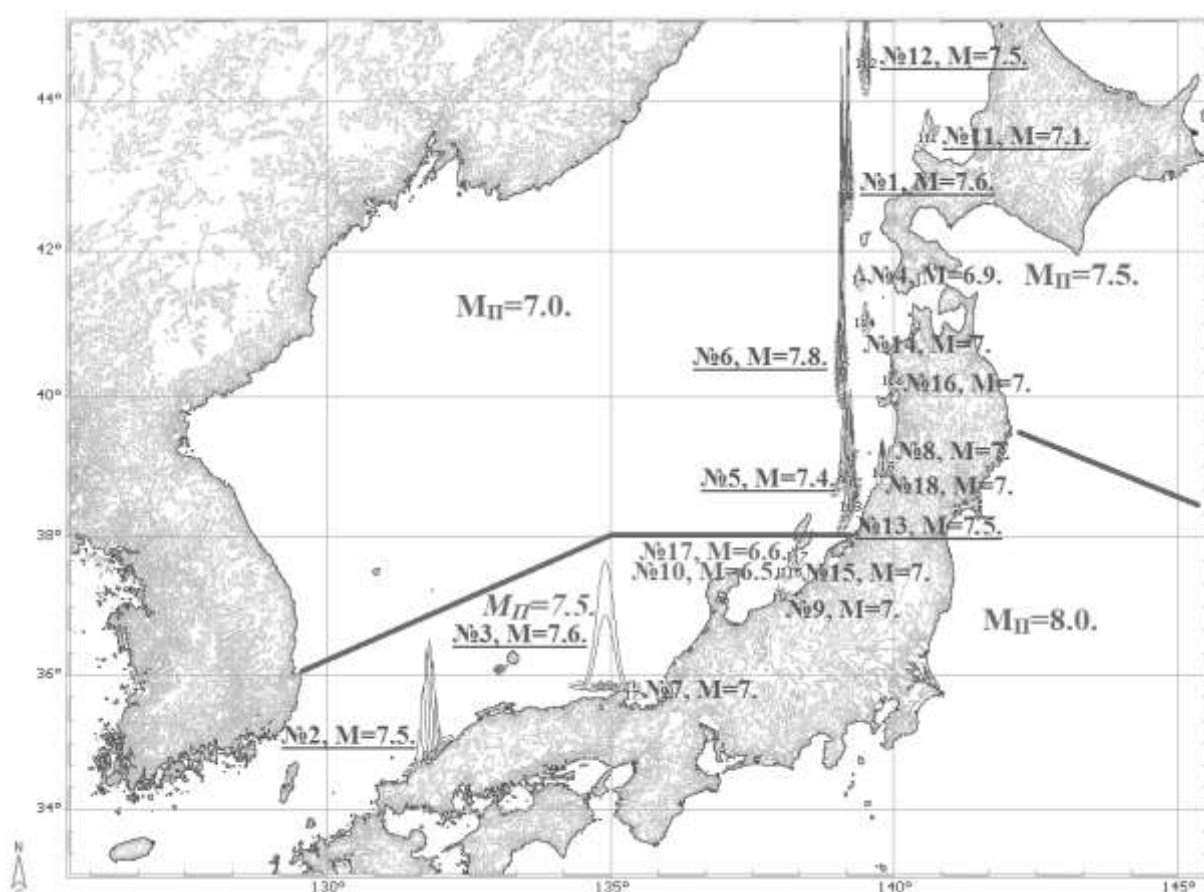


Рис. 2. Модельные источники цунами для глубины 10 км. Подчеркнуты источники, вызвавшие опасные цунами. Также на рисунке показано предложение по детализации пороговых магнитуд в Японском море (предлагаемый магнитудный порог, в отличие от действующих, выделен курсивом)

### Обсуждение результатов

Итак, в первой серии вычислительных экспериментов была получена пороговая магнитуда для модельных источников западнее о. Хонсю  $M_{II} = 7.7$ . На основании этого результата было

высказано предположение, что землетрясения с магнитудой  $M < 7.5$  в юго-восточной части Японского моря (западнее о. Хонсю) не порождают опасных для побережья Дальнего Востока России цунами. Для проверки данного предположения была проведена вторая серия вычислительных экспериментов.

Результаты второй серии вычислительных экспериментов позволяют утверждать, что землетрясения с магнитудой  $M < 7.5$  в юго-восточной части Японского моря (южнее  $38.00^{\circ}\text{N}$ ) не порождают опасных для побережья Дальнего Востока России цунами. Это подтверждается также анализом данных о реальных цунамигенных землетрясениях 01.05.1939 и 16.05.1964 с магнитудами  $M = 7$  и  $M = 7.5$  соответственно, эпицентры которых находились западнее о. Хонсю. Они не вызвали опасные цунами на побережье Дальнего Востока России.

На основании проведенных исследований авторы предлагают выделить зону с повышенной до  $M_{\text{п}} = 7.5$  пороговой магнитудой в Японском море, ограничив ее с севера и запада линиями:  $38.00^{\circ}\text{N}$ ,  $139.23^{\circ}\text{E}$  –  $38.00^{\circ}\text{N}$ ,  $135.00^{\circ}\text{E}$ ;  $39.00^{\circ}\text{N}$ ,  $135.00^{\circ}\text{E}$  –  $36.08^{\circ}\text{N}$ ,  $129.55^{\circ}\text{E}$  (мыс Чанги), а с юга и востока – Корейским проливом и западным побережьем о. Хонсю (рис. 2).

Реализация данного предложения позволит повысить эффективность Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России за счет сокращения числа ложных тревог.

### Список литературы

1. Заякин Ю.Я. Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: Камчат, 1996. 88 с.
2. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / под ред. Б.В. Левина, И.Н. Тихонова. М.: Янус-К, 2009. 204 с.
3. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 535 с.
4. Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непон К.И., Королев Ю.П. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. 273 с.
5. Поплавский А.А., Храмушин В.Н. Методы оперативного прогноза цунами и штормовых наводнений. М.: Наука, 2006. 272 с.
6. Поплавский А.А., Храмушин В.Н. Методы оперативного прогноза цунами и штормовых наводнений. Владивосток: Дальнаука, 2008. 176 с.
7. Поплавский А.А., Золотухин Д.Е., Храмушин В.Н. Макросейсмическая модель источника цунами и оценка ее эффективности при численном моделировании // Вулканология и сейсмология. 2012. № 1. С. 65–72.
8. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана (173–1968). М.: Наука, 1974. 309 с.
9. Цунами в регионах / Лаборатория цунами, Ин-т вычислит. математики и мат. геофизики СО РАН. URL: [http://tsun.ssc.ru/tsulab/tsun\\_hp\\_r.htm](http://tsun.ssc.ru/tsulab/tsun_hp_r.htm) (дата обращения: 09.08.2017).
10. Шебалин Н.В. Макросейсмическое поле и очаг сильного землетрясения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: Фонды ИФЗ АН СССР, 1969.
11. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. / Иващенко А.И., Гусяков В.К., Джумагалиев В.А., Йех Г., Жукова Л.Д., Золотухина Н.Д., Кайстренко В.М., Като Л.Н., Клочков А.А., Королев Ю.П., Кругляков А.А., Куликов Е.А., Куракин В.Н., Левин Б.В., Пелиновский Е.Н., Поплавский А.А., Титов В.В., Харламов А.А., Храмушин В.Н., Шельтинг Е.В. // ДАН. 1996. Т. 348. № 4. С. 532–538.
12. Global Historical Tsunami Database / NGDC/WDS (National Geophysical Data Center, NOAA / World Data Service). doi:10.7289/V5PN93H7. URL: [http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml) (дата обращения: 09.08.2017).