

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦУНАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Золотухин Д. Е.¹, Ивельская Т. Н.²

¹ *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, DimZol@rambler.ru*

² *Центр цунами, ФГБУ "Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды", Росгидромет, г. Южно-Сахалинск*

Введение

Одним из самых опасных природных явлений на Дальнем Востоке России является цунами. Для прогноза цунами в настоящее время активно используется численное моделирование. Поэтому оценка точности численного моделирования цунами с использованием различных программных комплексов является актуальной задачей. В данной работе выполнена оценка точности следующих программных комплексов: автоматизированной информационно-управляющей системы предупреждения о цунами (АИСПЦ), разработанной в Институте Вычислительных технологий СО РАН (ИВТ СО РАН) по заказу НПО «Тайфун» в 2008 г [1, 5, 6] и программного комплекса «ANI», разработанного В. Н. Храмушиным в 1997 году [9, 10]. Выбор этих программных комплексов обусловлен тем, что они применяются при прогнозе цунами в Сахалинской области. Так, программный комплекс «АИСПЦ» в настоящее время используется Центром цунами Сахалинского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Центром цунами СахУГМС) при принятии решения об объявлении и отмене тревоги цунами, для расчета высоты и времени подхода волн к защищаемым пунктам [1, 2, 6].

При помощи программного комплекса «ANI» было выполнено цунамирайонирование побережья Сахалинской области [4]. Также, с использованием программногo комплекса «ANI» в Центре цунами СахУГМС было впервые выполнено численное моделирование цунами 5.10.1994 г. в оперативном режиме [10].

Для оценки точности рассматриваемых программных комплексов в данной работе было выполнено моделирование восьми реальных исторических цунами. Для отдельных точек побережья Сахалинской области для каждого программного комплекса выполнялось сравнение реально наблюдавшихся заплесков цунами с соответствующими результатами численного моделирования. Общая оценка точности численного моделирования исторического цунами для каждого программного комплекса выполнялась путем расчета среднего квадратического отклонения (СКВО) результатов численного моделирования от данных наблюдений.

Среднее квадратическое отклонение результатов численного моделирования от данных наблюдений для каждого вычислительного эксперимента рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{m,i} - h_{p,i})^2}$$

где σ — среднее квадратическое отклонение; $h_{p,i}$ — реальный заплеск цунами в точке i ; $h_{m,i}$ — модельный заплеск цунами в точке i ; n — число точек.

Используемые натурные данные

В данной работе было выполнено численное моделирование восьми исторических цунами в Японском море и в акватории Тихого океана восточнее Курильских островов: цунами 5.09.1971 г. в районе острова Монерон [3]; цунами 26.05.1983 г. и 12.07.1993 г. у западного побережья Японии [14]; Симуширского цунами 15.11.2006 г. [11]; цунами Тохоку 11.03.2011 г. [13]; цунами 13.10.1963 г. на траверзе пролива Фриза [3, 4]; Южно-Курильского цунами 11.08.1969 г. [3, 4]; Шикотанского цунами 4.10.1994 г. [4, 10, 14]. Параметры цунамигенных землетрясений, вызвавших данные цунами, и источники данных о землетрясениях представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры моделируемых исторических цунамигенных землетрясений

Источник данных	дата	Координаты эпицентра		Глубина очага H , км	Магнитуда M_s
		ϕ° N	λ° E		
ISC	5.09.1971	46,54	141,15	14,1	7,1
ISC	26.05.1983	40,48	139,09	15,7	7,8
NGDC	12.07.1993	42,85	139,20	17	7,7
ISC	15.11.2006	46,68	153,21	12	7,8
NIES	11.03.2011	38,32	142,35	32	8,3
ISC	13.10.1963	44,81	149,54	47	8,1
ИВМиМГ	11.08.1969	43,56	147,83	27	7,8
ISC	4.10.1994	43,66	147,38	26	7,9

Пояснения к таблице.

ISC – Международный сейсмологический центр (Татхэм, Беркшир, Великобритания).

NGDC - Национальный геофизический центр данных (Боулдер, Колорадо, США).

NEIC – Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США (Голден, Колорадо, США).

ИВМиМГ СО РАН - Лаборатория цунами Института Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН (Новосибирск, Россия).

Для вышеперечисленных цунами существуют надежные ряды натуральных данных для отдельных точек побережья Дальнего Востока России. Это позволяет сравнить результаты численного моделирования исторических цунами с реальными заплесками соответствующих цунами в отдельных точках побережья Сахалинской области, представленными в таблице 2. Данные о заплесках исторических цунами взяты из [3, 4, 11, 13, 14].

Таблица 2. Заплески исторических цунами на побережье Сахалинской области (все высоты даны в метрах)

Населенный пункт	5.09.1971	26.05.1983	12.07.1993	15.11.2006
Южно-Курильск				0,4
Крильон			0,2	
Невельск	0,80	0,3-0,4		
Углегорск			0,26	
Малокурильское				1,53
Холмск	0,73	0,3-0,4	0,63	0,24
Населенный пункт	11.03.2011	13.10.1963	11.08.1969	4.10.1994
Буревестник	2	1,5	2	2,3
Южно-Курильск	1,8-2,2	1	1,1	2-3,7
Курильск		0,6	0,6	0,24
Малокурильское	1,6-2			2

Следует учесть, что часть натуральных данных (заплески цунами 26.05.1983 г., 12.07.1993 г.) была получена с использованием береговых мареографов. Возможно, это привело к занижению заплесков данных цунами.

Численное моделирование исторических цунами

Расчеты модельных высот волн цунами выполнялись для следующих мареографных точек:

Южно-Курильск ($44^\circ 02'$ с. ш., $145^\circ 51'$ в. д.).

Буревестник ($44^\circ 55'$ с. ш., $147^\circ 37'$ в. д.).

Малокурильское ($43^\circ 52'$ с. ш., $146^\circ 49'$ в. д.).

Курильск ($45^\circ 53'$ с. ш., $145^\circ 14'$ в. д.).

Невельск ($46^\circ 41'$ с. ш., $141^\circ 52'$ в. д.).

Холмск ($47^\circ 04'$ с. ш., $142^\circ 04'$ в. д.).

Крильон ($45^\circ 54'$ с. ш., $142^\circ 05'$ в. д.).

Углегорск ($49^\circ 05'$ с. ш., $142^\circ 04'$ в. д.).

Численное моделирование цунами выполнялось с использованием программных комплексов «ANI» и «АИСПЦ».

В данной работе при численном моделировании цунами с использованием программного комплекса «ANI» применялся предложенный в [9] макросейсмический источник цунами. В этой модели реальный источник заменяется эллиптическим в плане начальным возвышением уровня,

проектирующегося на зону максимальных сотрясений при землетрясении. Горизонтальные размеры и возвышение модельного источника цунами определяются, исходя из параметров макросейсмического очага (глубина очага и магнитуда цунамигенного землетрясения). Необходимая для оценки макроскопического эффекта землетрясения магнитуда определяется из наблюдений, а глубина очага либо принимается известной априори (т.н. эквивалентная глубина - наиболее вероятная глубина очага в районе возникновения землетрясения [7]), либо также определяется из наблюдений. Стоит отметить, что координаты эпицентров модельных землетрясений для обоих программных комплексов могут незначительно отличаться от реальных, что вызвано особенностями батиметрических сеток.

Таблица 3. Параметры численного моделирования цунами с использованием программы «ANI»

№	дата	Координаты эпицентра		Глубина очага H , км	Магнитуда, M
		$\phi^{\circ} N$	$\lambda^{\circ} E$		
1.1	5.09.1971	46°32'	141°09'	14,1	7,1
1.2	5.09.1971	46°32'	141°09'	24	7,1
2.1	26.05.1983	40°29'	139°05'	15,7	7,8
2.2	26.05.1983	40°29'	139°05'	24	7,8
3.1	12.07.1993	42°51'	139°12'	17	7,7
3.2	12.07.1993	42°51'	139°12'	24	7,7
4.1	15.11.2006	46°41'	153°13'	12	7,8
4.2	15.11.2006	46°41'	153°13'	36	7,8
5.1	11.03.2011	38°19'	142°21'	32	8,3
5.2	11.03.2011	38°19'	142°21'	36	8,3
6.1	13.10.1963	44°49'	149°32'	47	8,1
6.2	13.10.1963	44°49'	149°32'	36	8,1
7.1	11.08.1969	43°34'	147°50'	27	7,8
7.2	11.08.1969	43°34'	147°50'	36	7,8
8.1	4.10.1994	43°40'	147°23'	26	7,9
8.2	4.10.1994	43°40'	147°23'	36	7,9

Таблица 4. Параметры численного моделирования цунами с использованием программы «АИСЩ»

№	дата	Координаты эпицентра		Глубина очага H , км	Магнитуда, M
		$\phi^{\circ} N$	$\lambda^{\circ} E$		
11.1	5.09.1971	46,5	141,2	14,1	7,1
11.2	5.09.1971	46,5	141,2	33	7,1
12.1	26.05.1983	40,5	139,1	15,7	7,8
12.2	26.05.1983	40,5	139,1	33	7,8
13.1	12.07.1993	42,9	139,2	17	7,7
13.2	12.07.1993	42,9	139,2	33	7,7
14.1	15.11.2006	46,7	153,2	12	7,8
14.2	15.11.2006	46,7	153,2	33	7,8
15.1	11.03.2011	38,3	142,4	32	8,3
15.2	11.03.2011	38,3	142,4	33	8,3
16.1	13.10.1963	44,8	149,5	47	8,1
16.2	13.10.1963	44,8	149,5	33	8,1
17.1	11.08.1969	43,6	147,8	27	7,8
17.2	11.08.1969	43,6	147,8	33	7,8
18.1	4.10.1994	43,7	147,4	26	7,9
18.2	4.10.1994	43,7	147,4	33	7,9

В ходе численного моделирования исторических цунами с использованием программы «ANI» применялась как реальная глубина цунамигенных землетрясений, так и «эквивалентная» глубина, равная 24 км для Японского моря и 36 км – для акватории Тихого океана восточнее Курильских и Японских островов [7, 8]. При этом использовались батиметрические сетки с шагом 1 км. Параметры численного моделирования исторических цунами приведены в таблице 3. Результаты численного моделирования цунами приведены в таблице 5.

В ходе численного моделирования с использованием программы «АИСПЦ» применялась как реальная глубина цунамигенных землетрясений, так и используемая по умолчанию при работе Центра Цунами СахУГМС «эквивалентная» глубина, равная 33 км. Параметры численного моделирования исторических цунами приведены в таблице 4. Численное моделирование с использованием программного комплекса «АИСПЦ» проводилось на сетке с шагом 15 угловых секунд, и было основано на модели Подъяпольского – Гусякова - Окады. Расчет трансформации волн выполняется от области источника смещения вплоть до линии берега [6]. Результаты численного моделирования цунами приведены в таблице 5.

Анализ полученных результатов

Таким образом, для каждого исторического цунами было выполнено четыре численных эксперимента: с использованием программных комплексов «ANI» и «АИСПЦ», с заданием реальных и «эквивалентных» глубин модельного цунами для каждого комплекса. При сравнении результатов численного моделирования цунами с данными наблюдений, для каждого вычислительного эксперимента было рассчитано среднее квадратичное отклонение (СКВО) модельных высот цунами в отдельных точках побережья от соответствующих данных наблюдений. Результаты сравнения представлены в таблице 5.

Таблица 5. Сравнение натуральных данных с результатами численного моделирования (среднее квадратичное отклонение модельных заплесков от данных наблюдений в метрах; для каждого цунами выделено минимальное СКВО)

Численная модель	5.09.1971	26.05.1983	12.07.1993	15.11.2006
“ANI”, эквивалентная глубина	0,58	0,86	0,18	0,63
“ANI”, реальная глубина	0,67	0,66	1,01	3,35
«АИСПЦ», эквивалентная глубина	1,46	0,23	0,25	0,42
«АИСПЦ», реальная глубина	1,52	0,26	0,24	0,49
Численная модель	11.03.2011	13.10.1963	11.08.1969	4.10.1994
“ANI”, эквивалентная глубина	0,37	3,06	1,22	0,53
“ANI”, реальная глубина	0,74	1,40	2,56	3,06
«АИСПЦ», эквивалентная глубина	0,99	3,07	1,64	2,65
«АИСПЦ», реальная глубина	0,80	3,07	1,65	2,60

Анализируя результаты численных экспериментов, можно сделать следующие выводы:

При использовании «эквивалентной» глубины точность моделирования с применением программы «ANI» существенно возрастает; в программе «АИСПЦ» глубина модельного очага цунами не оказывает заметного влияния на результаты расчетов.

При использовании реальных глубин очага программа «АИСПЦ» дает несколько более точные результаты; при использовании «эквивалентной» глубины очага можно говорить о преимуществе программы «ANI» в точности моделирования. Это показано на рисунке 1, на примере сравнения результатов численного моделирования цунами 4.10.1994 с использованием программы «ANI» (для реальной и «эквивалентной» глубины) и программы «АИСПЦ» (для «эквивалентной» глубины; использование реальной глубины для данного программного комплекса дает близкие результаты) с данными наблюдений. Также на рисунке 1 показан модельный источник цунами 4.10.1994 г. (программный комплекс «ANI», «эквивалентная» глубина).

В реальных условиях работы Центра цунами СахУГМС, в которых из-за отсутствия информации о глубине очага цунамигенного землетрясения используется «эквивалентная» глубина очага, программный комплекс «ANI» формально имеет некоторое преимущество над «АИСПЦ». Однако его применение в службе предупреждения о цунами затруднено менее дружественным интерфейсом, чем в комплексе «АИСПЦ».

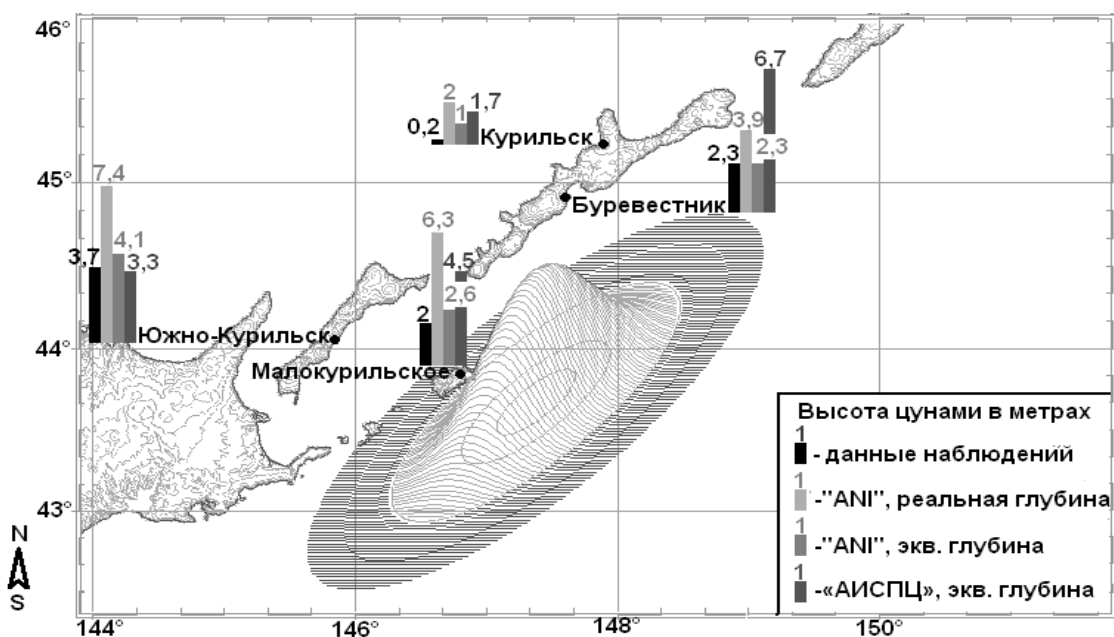


Рис. 1. Сравнение натуральных данных с результатами численного моделирования цунами 4.10.1994 г., с использованием программных комплексов «ANI» и «АИСПЦ».

Работа выполнена при грантовой поддержке РФФИ (тема 12/13-Р).

Список литературы

1. Автоматизированная информационно-управляющая система предупреждения о цунами: Руководство пользователя. Обнинск: 2008. 105 с.
2. Ивельская Т.Н., Храмушин В.Н., Шевченко Г.В. Чилийское цунами 27 февраля 2010 года: проверка состояния службы предупреждения.// Проблемы анализа риска. 2010. Т.7. №2. С. 34-47.
3. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 535 с.
4. Отчет о НИР «Оценка риска цунами морской береговой зоны. Составление карты риска цунами береговой зоны Сахалинской области в масштабе 1:200 000». Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 93 с.
5. Отчет по третьему этапу НИОКР «Моделирование и анализ характеристик проявления удаленных цунами у защищаемых пунктов Дальневосточного побережья Российской Федерации». Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2012. 96 с.
6. Порядок расчета максимальных волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации. Разработан Государственным учреждением «Научно-производственное объединение "Тайфун" (ГУ НПО «Тайфун») Росгидромета. Обнинск: 2010. 34 с.
7. Поплавский А. А., Бобков А. О. О распределении дальневосточных землетрясений по глубине и магнитуде.// Строеение, геодинамика и металлогения охотского региона и прилегающих частей северо-западной тихоокеанской плиты: материалы международного научного симпозиума, 24 – 28 сентября 2002 г: сб. статей. Южно-Сахалинск: 2002. Том 2. С. 64 – 88.
8. 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.
9. Поплавский А. А., Храмушин В. Н. Методы оперативного прогноза цунами и штормовых наводнений. Владивосток: Дальнаука, 2008. 176 с.
10. Поплавский А. А., Храмушин В. Н. Непоп К. И., Королев Ю. П. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. Южно-Сахалинск: 1997. 273 с.
11. Тихонов И. Н. Василенко Н. Ф., Золотухин Д. Е., Ивельская Т. Н., Поплавский А. А., Прытков А. С., Спиринов А. И. Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года.// Тихоокеанская геология. 2008. Т 27. № 1. С. 3-16.
12. Шебалин Н. В. Макросейсмическое поле и очаг сильного землетрясения: дис. ... физ.-мат. наук. М.: Фонды ИФЗ АН СССР. 1969.
13. Kaistrenko V., Razjigaeva N., Kharlamov A., Shishkin A. Manifestation of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Coast of the Kuril Islands: A Tsunami with Ice. // Pure and Applied Geophysics. 2012. Springer Basel AG. DOI 10.1007/s00024-012-0546-9.
14. Yuzhno-Sakhalinsk Tsunami Warning Center (YSTWC), Sakhalin isl. Russia. URL: <http://www.sakhgu.ru/expert/Tsunami/Index.html>